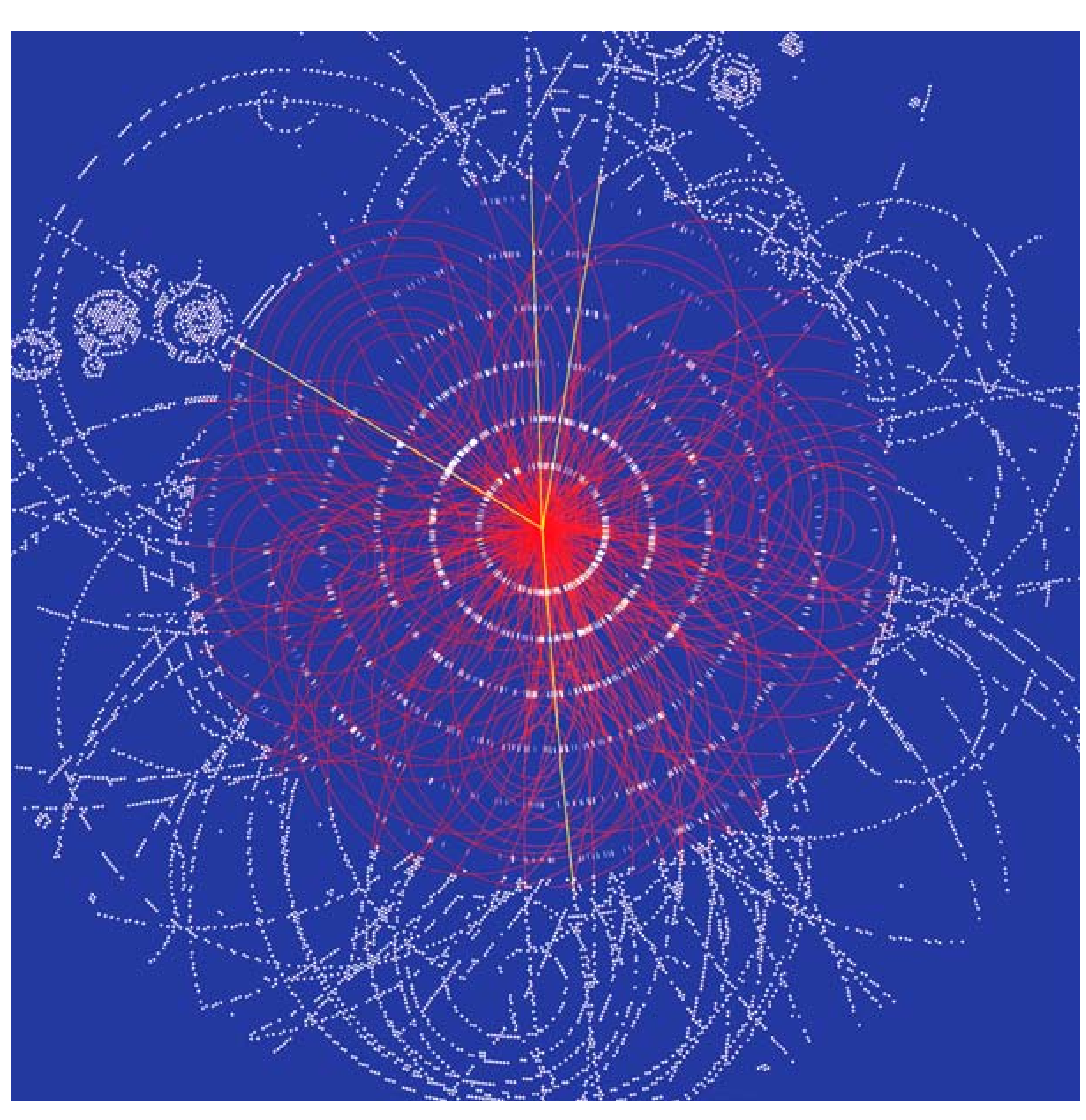
INVESTIGACION y CIENCIA

ASI SE ENCONTRO EL QUARK CIMA

LOS NUEVOS VIRUS: EL CASO EBOLA

FISICA Y ESPIONAJE EN LA SEGUNDA GUERRA MUNDIAL

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



¿BOSON DE HIGGS?

JULIO 1995
700 PTAS.



Julio de 1995 Número 226

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN 150 YEARS OF INNOVATION

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *¿Reveló Bohr secretos nucleares?* y *¿Qué le contó Heisenberg a Bohr sobre la bomba atómica?*; Mónica Murphy: *Estrellas binarias de neutrones*; Ana M.ª Rubio: *Los nuevos virus* y *Conservación del pasado*; Javier de Mendoza: *Moléculas dendrímeras*; J. Vilardell: *Hace...*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; J. M. García de la Mora: *Ensayo*

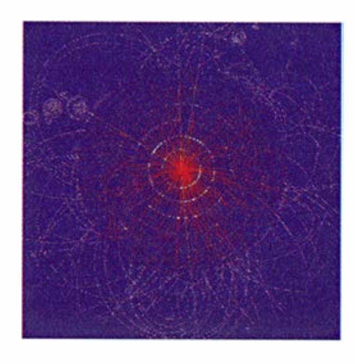
Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: CERN

Página	Fuente
7	Instituto Niels Bohr
8-9	Gregory Manchess
11	Archivo Visual Emilio Segrè
13	Roberto Osti
14	Wide World Photos
17	Paul Ehrenfest, Jr., Archivo Visual Emilio Segrè
18	Laboratorio Nacional de Los Alamos (*izquierda*); Robert Prochnow (*centro*)
19	Wide World Photos (*izquierda*); Archivo Visual Emilio Segrè, cortesía de Ingbert Grüttner (*centro*)
20	UPI/Bettmann (*izquierda*); Robert Prochnow (*centro*)
22-23	Al Kamajian
24-25	Al Kamajian (*abajo*); George Retseck (*arriba*)
26-27	George Retseck (*arriba*); Laurie Grace (*abajo*)
28	George Retseck
29	John Long
45	Pierre Gounon, Instituto Pasteur, París
46	Doc. PLS (*arriba*); P. Gounon, Instituto Pasteur, París (*abajo*)
47	Documentos PLS
48	P. Horber
49	Doc. PLS (*izquierda*); M. Artois CNEVA (*derecha*)
50	Documentos PLS
51	M. A. Camprasse, Instituto Pasteur, París
52	Petar Dvornic y Scrinivas Uppuluri, Instituto Molecular de Michigan
53	Bruce Eichinger, Tecnologías Biosym
54	Laurie Grace
55	Dale J. Meier y Yuelin Zou, Instituto Molecular de Michigan
56	Tomo Narashima
59	CERN (*arriba y abajo*); DESY (*derecha*)
60-61	CERN
62	Ian Worpole
64-71	J. M. Fernández de Labastida
72-73	Stephen Ferry, Gamma Liaison
74-75	Dusan Stulik, Instituto de Conservación Getty
76	Instituto de Conservación Getty (*izquierda*) Infobyte; Instituto de Conservación Getty (*abajo*)
77	Hedda Morrison, cortesía del Instituto de Conservación Getty (*izquierda*); Margaret G. H. Mac Lean, Instituto de Conservación Getty (*derecha*)
78	Stephen Ferry, Gamma Liaison (*arriba*); Laboratorio de Propulsión a Chorro/NASA (*abajo*)
86	Dianne Gaspas ETTL



La detección del bosón de Higgs puede parecerse a esta simulación por ordenador. El choque entre protones puede producir un Higgs que se desintegra en cuatro muones (*líneas amarillas*). Se producirán también partículas residuales (*rojo*). En seis capas cilíndricas (*líneas blancas*) de microcintas de silicio se registrará el lugar en que las partículas cargadas atraviesan las capas detectoras. Estas posiciones, combinadas con las obtenidas de un sistema (*puntos blancos*), permitirán reconstruir las trayectorias.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Marguerite Holloway, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Associate Editor*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler; Philip Morrison, *Book Editor*; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; Corey S. Powell; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam; Glenn Zorpette
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens
DIRECTOR, ELECTRONIC PUBLISHING Martin Paul

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.600	15.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A., Avila, 112-114 4ª pl. - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A., Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «A consecuencia de un nuevo descubrimiento en el moldeo por inyección, las almas de madera de los tacones femeninos pueden ahora recibir automáticamente un recubrimiento uniforme de acetato de celulosa de un espesor aproximado de un milímetro y medio. Estos nuevos tacones recubiertos de plástico, de los que se afirma que poseen una resistencia al desgaste muy superior a los de cualquier otro zapato, no se rayan ni estropean, ni su recubrimiento se rae, se agrieta o se pela. Además, pueden hacerse de cualquier tamaño, forma o estilo y con un acabado mate o brillante en prácticamente todos los colores.»

«Un dispositivo nuevo e interesante consiste simplemente en un colchón gigante que se emplea para izar aviones sobre terreno blando o tras haber sufrido un aterrizaje con daños. El equipo pesa unos cien kilogramos y se compone de un juego de tres sacos inflables y un soplante o compresor accionado por un motor de gasolina. Cada saco inflado alcanza un metro ochenta de altura y puede soportar 12 toneladas. Incluso un automovilista podría a veces preferir algo parecido al molesto ejercicio de manipular el clásico gato de automóvil.»

«Se han resuelto los detalles preliminares de lo que se cree será el primer edificio de hospital totalmente soldado del país. Se ha propuesto que la estructura de esta nueva construcción, que será conocida como Hospital Kahler, ubicada en Rochester (Minnesota), se proyecte a modo de estructura continua de vigas con sus miembros de enlace. Al preparar las especificaciones, los arquitectos descartaron cualquier idea de construcción roblonada, lo que tendería a restringir el rango de aplicabilidad de ciertos detalles soldados.»

«El carbono activo, primo químico tanto del diamante como del coque, es un poderoso instrumento para un número creciente de aplicaciones, que van desde las máscaras de gas para salvar vidas humanas hasta la preservación de una multitud de materias valiosas. Los carbonos activos pueden hacerse a la medida para adaptarse a necesidades diversas y, según los doctores Ernst Bel y Walter C. Berl, del Instituto Carnegie de Tecnología, su gran superficie, porosa y llena de picaduras, "es una potente herramienta para la adsorción, eliminación o recuperación de un sinfín de sustancias deseables e indeseables".»

«Perfilándose en el horizonte como algo que la industria ya tiene dispuesto para el ama de casa se halla lo que se ha dado en llamar la "limpieza automática". Se trata de una de las partes de un sistema de acondicionamiento de aire que, por medios electrónicos, elimina el polvo del aire antes de que tenga ocasión de posarse en los muebles y por ello reduce a un mínimo la penosa tarea de quitar el polvo. Este "plumero automático" hace innecesario limpiar el polvo más de una vez al mes.»

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Es corriente que en esta época del año se deseen fuegos artificiales; pero ante su naturaleza venenosa y explosiva, su manejo reclama el máximo cuidado. Para prepararlos, los ingredientes, que deben hallarse perfectamente secos, han de pulverizarse y cribarse en un tamiz de crin por separado y luego introducirse en botellas de boca ancha muy bien taponadas hasta que estén listos para ser mezclados. No es nada recomendable provocar, en recintos cerrados, fuegos artificiales hechos con azufre o con sales de metales venenosos (antimonio, arsénico, mercurio, etc.).»

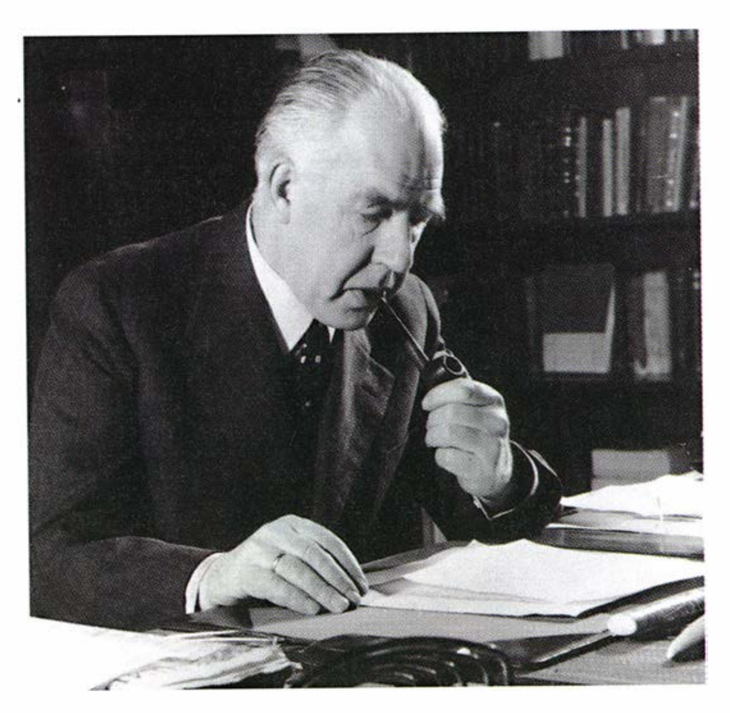
«El eminente naturalista Thomas Henry Huxley falleció el 29 de junio de 1895, con la mente lúcida hasta el último instante. Su muerte deja ahora a Herbert Spencer como único superviviente del gran cuarteto de gigantes del pensamiento, Darwin, Tyndall, Huxley y Spencer, quienes lograron imponer sus puntos de vista acerca de las relaciones del hombre con las formas de vida inferiores y con el cosmos, lo que habitualmente llamamos "evolución", ante un público poco dispuesto y recalcitrante.»

«Los fenómenos atmosféricos más interesantes tienen lugar en lugares casi inaccesibles, pero los globos y los observatorios de montaña han posibilitado algunos inesperados descubrimientos en esas altitudes. Por ejemplo, muchas nubes que generalmente se consideraron formadas por vapor están constituidas por minúsculos cristales de hielo; más aún, a diferentes alturas, la velocidad del viento es diferente, y la temperatura no desciende uniformemente a medida que la tierra se hace más distante, si no que se encontraron capas alternas de aire caliente y frío.»

«Durante la insurrección cubana de 1868 las tropas españolas abandonaron sobre el terreno una rueda dentada y un volante de gran tamaño que ahora, transcurridos 25 años, mostramos en nuestra ilustración. Al cabo de ese tiempo un jagüey ha brotado entre los dientes de la rueda. El desarrollo de ese árbol nos da alguna idea de la flora cubana y de la rapidez con que florece y se multiplica en el suelo.»

Vestigios de una insurrección cubana

La cuestión atómica



Bohr, 1935

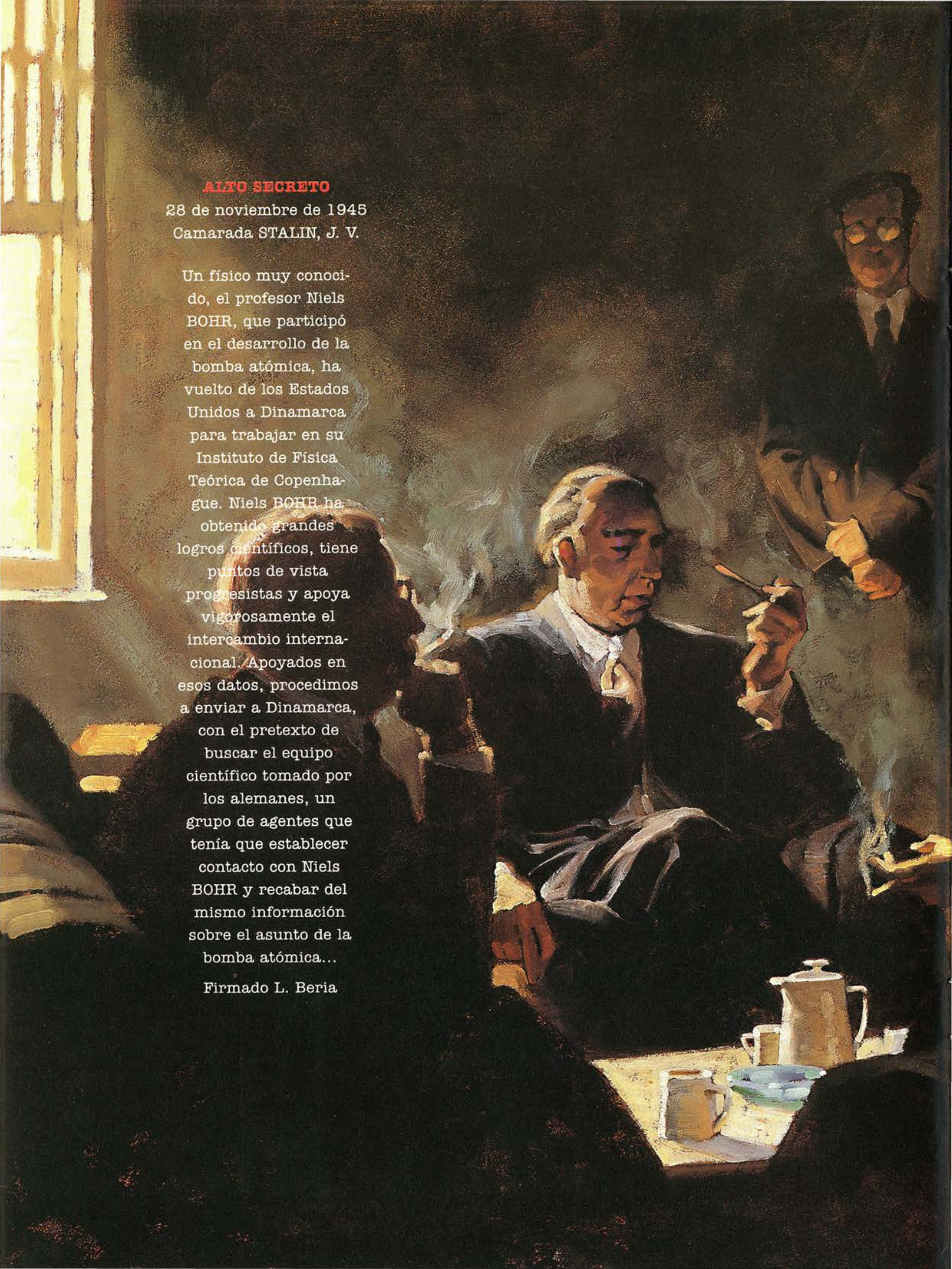
No se asocia el escándalo al nombre de Niels Bohr; sí genio y carácter. Ganador del premio Nobel, introductor de la mecánica cuántica en la explicación de la naturaleza del átomo, fue un titán de la ciencia del siglo XX. Se opuso a la ocupación nazi de su Dinamarca natal; refugiado en los Estados Unidos, participó en el proyecto Manhattan, que daría a esa nación el poder nuclear. Pero Bohr fue también un notorio abogado de la cooperación internacional, y encareció a Franklin D. Roosevelt y Winston Churchill que, en pro de la paz mundial, permitiesen que otros países conocieran los entresijos de la bomba atómica.

Movido por esas convicciones, ¿no fue Bohr demasiado lejos? El año pasado, fuentes que parecían bien acreditadas hicieron público que Bohr pasó a la Unión Soviética información reservada del programa estadounidense para la fabricación de la bomba. Las sospechas se centran en un encuentro entre Bohr y la policía secreta de Beria que tuvo lugar en 1945.

Estas suspicacias carecen de fundamento, como deja claro el primero de los artículos que siguen. Los autores, físicos de renombre por derecho propio, repasan las circunstancias que condujeron al encuentro y muestran que Bohr no intentó ocultarlo a las autoridades. Además, basándose en un memorándum destinado a Stalin que incluye una transcripción de la conversación, sostienen que Bohr se expresó de forma deliberadamente vaga acerca de lo que sabía. La autoridad académica de los autores disipa las nubes que nunca debieron posarse sobre la figura intachable de Bohr.

Se aborda luego un episodio de la vida del danés no menos apasionante: ¿facilitó a los aliados el programa alemán de armas nucleares? El autor de este segundo artículo, un físico convertido en detective, sigue una pista de hace cincuenta años para descubrir si Bohr recibió el dibujo de un dispositivo nuclear de manos de Werner Heisenberg. La trama retrata una época no tan lejana en la que el equilibrio del poder y los misterios del espionaje pendían sobre el trabajo de todo físico que estudiara los secretos del átomo.

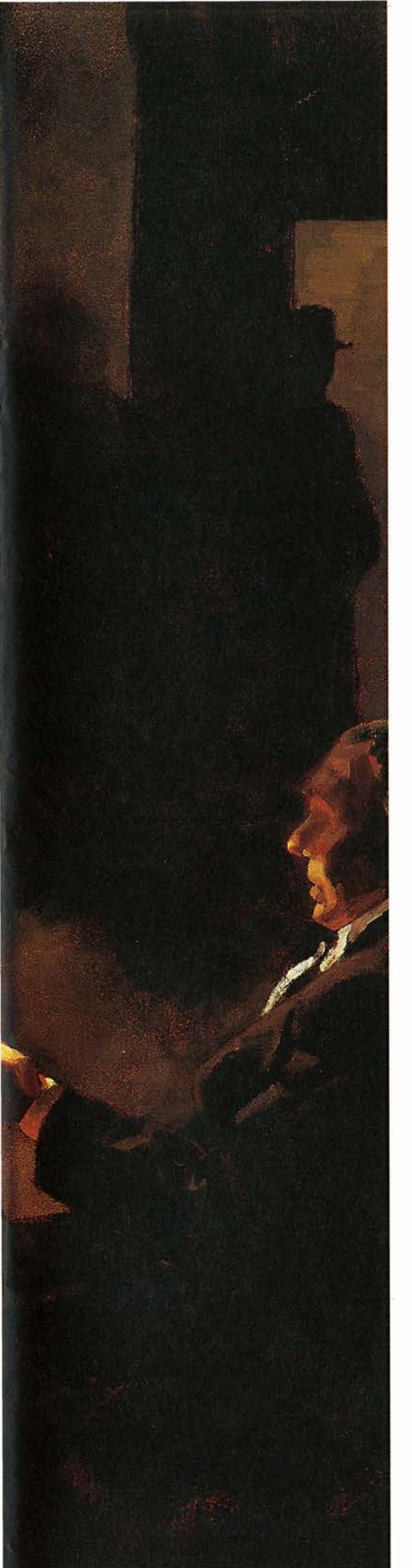
La redacción



ALTO SECRETO
28 de noviembre de 1945
Camarada STALIN, J. V.

Un físico muy conocido, el profesor Niels BOHR, que participó en el desarrollo de la bomba atómica, ha vuelto de los Estados Unidos a Dinamarca para trabajar en su Instituto de Física Teórica de Copenhague. Niels BOHR ha obtenido grandes logros científicos, tiene puntos de vista progresistas y apoya vigorosamente el intercambio internacional. Apoyados en esos datos, procedimos a enviar a Dinamarca, con el pretexto de buscar el equipo científico tomado por los alemanes, un grupo de agentes que tenía que establecer contacto con Niels BOHR y recabar del mismo información sobre el asunto de la bomba atómica...

Firmado L. Beria



¿Reveló Bohr secretos nucleares?

Niels Bohr se encontró con un agente soviético a finales de 1945. Algunos le acusan de haber divulgado secretos nucleares

Hans A. Bethe, Kurt Gottfried y Roald Z. Sagdeev

"La información más vital para el desarrollo de la primera bomba atómica soviética procedió de algunos de los científicos que proyectaron la bomba atómica en Los Alamos. ... Aceptaron compartir información sobre armas nucleares con los soviéticos. ..."

Esta acusación sensacionalista aparece en el libro *Special Tasks*, publicado en 1994. Culpa a Bohr y a otros científicos del proyecto Manhattan de haber proporcionado al espionaje soviético informaciones confidenciales sobre el programa estadounidense sobre fabricación de la bomba atómica. El libro, basado en los recuerdos de Pavel Sudoplatov, gerifalte de la policía secreta de Stalin, no aporta prueba alguna de tan grave cargo. Pero la sombra de la duda se ha hecho cada vez más densa.

También acaba de salir a la luz —sacado de los archivos del KGB— un memorándum dirigido a Stalin donde se narra la "conexión Bohr". El documento contiene una descripción, se supone que literal, del mismísimo encuentro de noviembre de 1945 en el que Bohr pasaría a los soviéticos informaciones reservadas. Tras revisar con lupa el documento, hemos encontrado pruebas de que las acusaciones contra Bohr son falsas.

Para entender la polémica y nuestro análisis del memorándum conviene recordar el desarrollo de la física nuclear antes de la guerra y los esfuerzos que durante el conflicto se invirtieron en aplicar la ciencia a la maquinaria bélica. A principios de siglo se había descubierto que el átomo consta de un núcleo, que contiene los protones y cuya carga es positiva, y de los electrones que giran a su alrededor. Se sabía también que, dentro del núcleo, la energía supera millones de veces la liberada en las explosiones químicas. No se avanzó gran trecho en la estructura del núcleo hasta que en 1932 James Chadwick, de la Universidad de Cambridge, descubrió el neutrón. Sus trabajos demostraron que el núcleo se compone de protones y neutrones.

El neutrón se convirtió enseguida en una sonda para desentrañar las propiedades del núcleo. Al carecer los neutrones de carga eléctrica, el núcleo, dotado de carga positiva, no los repele; pueden así entrar con facilidad en los núcleos de muchos elementos, proceso que recibe el nombre de "captura de neutrones". Se estudiaron numerosas reacciones nucleares en las que intervenía la captura de neutrones, pero ninguna producía cambios llamativos en el núcleo.

En diciembre de 1938 Otto Hahn y Fritz Strassmann, del Instituto Kaiser Wilhelm de Berlín, observaron en el uranio, el elemento más pesado que por entonces se conocía, una reacción asombrosa. Les sorprendió que entre los productos del bombardeo del uranio con neutrones estuviese el bario, un elemento bastante ligero. Otto Frisch y Lise Meitner, dos huidos de la Alemania nazi, interpretaron que la observación de Hahn y Strassmann indicaba que el núcleo de uranio se dividía en dos núcleos de tamaño parecido.

1. ENCUENTRO ENTRE NIELS BOHR y Iakov Terletskii (*a la derecha*), en una recreación artística. La visita tuvo lugar en noviembre de 1945 en el despacho de Bohr en Copenhague. Terletskii acudió con un intérprete (*izquierda*); a Bohr (*centro*) le acompañaban dos de sus hijos, Ernest (*derecha*), que hizo guardia en otro cuarto con una pistola cargada, y Aage (*de pie*), que permaneció en la habitación. Un memorándum dirigido a Stalin (*del que se traduce un fragmento a la izquierda*) incluía una transcripción de la conversación entre Bohr y Terletskii.

Una conversación en Copenhague

Los siguientes extractos de la conversación entre Terletskii y Bohr están sacados de una traducción de la transcripción que se le entregó a Stalin en 1945.

TERLETSKII: ¿Qué método práctico hay para obtener uranio 235 en grandes cantidades, y qué método se considera que es el más prometedor (por difusión, magnético u otro)?

BOHR: Los científicos de todos los países conocen bien la teoría de la obtención de uranio 235; se desarrolló antes de la guerra y no presenta secretos. La guerra no ha añadido prácticamente nada nuevo. Hay que señalar, sin embargo, que el problema del reactor de uranio y el del plutonio que sale de él se resolvieron ambos durante la guerra, si bien los principios tampoco eran nuevos. Tan sólo se llevaron a la práctica. El principal avance se refiere a la separación del uranio 235 de la mezcla natural de isótopos. Una vez se obtiene la cantidad requerida de uranio 235, no se alza dificultad teórica alguna en el camino hacia la bomba. La separación del uranio 235 se logra mediante el método de difusión, que es bien conocido, y también mediante la espectroscopía de masas. No se ha usado ningún método nuevo. El éxito norteamericano se debe a la realización práctica de diseños bien conocidos a una escala increíblemente grande. Debería advertirle que, mientras estuve en los Estados Unidos, no participé en el desarrollo técnico del proyecto, y por tanto no me son familiares las características de los diseños o el tamaño de los aparatos, ni siquiera parte alguna de ellos...

Frisch y Meitner le dieron al proceso el nombre de "fisión". Razonaban que la repulsión eléctrica entre los muchos protones que hay en los núcleos más pesados les hacía a éstos casi inestables; por tanto, la captura de otro neutrón podría causar que se partiesen. Calcularon también que, si el uranio se escindía en dos, se liberaría muchísima más energía que en todas las reacciones nucleares observadas hasta ese momento.

En la pequeña comunidad internacional de los físicos nucleares prendió una actividad frenética. Al principio les movía la curiosidad científica, y todos los resultados nuevos se publicaron sin trabas. Pero dos descubrimientos de principios de 1939 iban a ser de capital importancia en los programas militares que se emprenderían tras la invasión de Polonia por Adolf Hitler en septiembre del mismo año.

Durante una corta estancia en la Universidad de Princeton, en el invierno de 1939, Bohr conjeturó que sólo una minúscula fracción de los núcleos del mineral de uranio experimentaba la fisión observada. El segundo descubrimiento crucial, hecho por dos grupos independientemente, fue que el núcleo de uranio emitía varios neutrones durante el proceso de fisión. Estos neutrones secundarios podían, pues, inducir la fisión de otros núcleos e iniciar así una reacción en cadena.

Con el físico norteamericano John Wheeler, Bohr elaboró una teoría minuciosa de la fisión gracias a la cual ambos pudieron predecir si el núcleo de un elemento dado sufriría o no la fisión tras la captura de un neutrón. Ponderaron también la probabilidad de que los núcleos padeciesen la fisión "espontáneamente", es decir, sin que les desestabilizase primero un neutrón capturado.

Con su nueva teoría, Bohr y Wheeler reforzaron la idea del primero según la cual sólo una pequeña fracción de los núcleos del uranio natural experimentaba la fisión inducida por neutrones. Mostraron, en concreto, que esos núcleos eran de un tipo raro, el uranio 235. Como le pasa a la mayoría de los elementos, hay varias formas de uranio, o isótopos, que difieren entre sí por el número de neutrones de sus núcleos. Por ejemplo, el uranio 235, que constituye el 0,7 por ciento del mineral de uranio natural, tiene 143 neutrones y 92 protones; el número de masa 235 es la suma del número de neutrones y el de protones. El isótopo más abundante, el uranio 238, tiene 146 neutrones además de los 92 protones.

Varios experimentos confirmaron pronto la predicción de Bohr de que sólo el uranio 235 sufría la fisión inducida por neutrones. De este hallazgo se seguía que las técnicas que se basaran en la fisión del uranio requerirían seguramente el aislamiento del uranio 235. Pero la consecución de ese aislamiento sería sumamente difícil. La manera en que un átomo se comporta en cualquier proceso químico queda determinada por la carga eléctrica del núcleo y no depende, pues, del número de neutrones. Por tanto, no se podía separar en el mineral el uranio 235 del 238 mediante un proceso químico, fuese el que fuese. La separación tendría que descansar sólo en la muy pequeña diferencia de peso (un uno por ciento) entre el isótopo raro y los abundantes. No se conocía por entonces ningún método de separación a gran escala que fuese, ni remotamente, costeable.

Esta dificultad engendró en un principio un gran escepticismo acerca de que la fisión nuclear pudiera tener aplicaciones prácticas. Muchos físicos, de todas las grandes naciones que pronto estarían en guerra, entendían que la reacción en cadena en el uranio podría desarrollar dos funciones, distintas aunque estrechamente relacionadas, de profundo alcance. En primer lugar, una reacción en cadena autoabastecida haría posibles las centrales de energía nuclear. En segundo lugar, si la reacción en cadena se multiplicaba indefinidamente, generaría una explosión descomunal. Pero como la posibilidad de aislar el suficiente uranio 235 para hacer una bomba parecía utópica, casi nadie creía que se pudiese fabricar un dispositivo así en un futuro previsible, y mucho menos aún que pudiera influir en el resultado de la guerra.

A pesar de lo improbable que parecía, el miedo a que Alemania —que tan destacado papel había desempeñado en la física moderna— produjese armas nucleares hizo que los físicos de Gran Bretaña y Estados Unidos abogasen por la investigación de los usos militares de la fisión. El programa norteamericano de armas nucleares empezó modestamente en 1940 con una subvención gubernamental de 6000 dólares con-

HANS A. BETHE, KURT GOTTFRIED y ROALD Z. SAGDEEV comparten una misma preocupación por las consecuencias políticas de las armas nucleares. Bethe, hoy profesor emérito de la Universidad de Cornell, dirigió la división de física teórica del laboratorio de Los Alamos durante la segunda guerra mundial. En 1967 ganó el premio Nobel. Gottfried enseña física nuclear en Cornell. Sagdeev, docente ahora en la Universidad de Maryland, ha sido asesor de Mikhail S. Gorbachov y director del Instituto de Investigaciones Espaciales Soviético.

Comentario de los autores: Si ésta fue de verdad la respuesta emitida por Niels Bohr, echó mano de una arrogancia intelectual que no era habitual en él para no tener que dar una contestación más sustanciosa. Los métodos de separación que menciona sólo podían aislar cantidades minúsculas de isótopos específicos, no kilogramos. Muchos creyeron (especialmente Bohr) que este problema suponía un obstáculo insuperable para la construcción de bombas atómicas. Fueron necesarias innovaciones ingeniosas para que la separación de isótopos a gran escala fuese factible. La respuesta de Bohr viene a ser como si se le hubiese preguntado a Isaac Newton cómo podría ponerse a una persona en la Luna y el físico inglés hubiera respondido que, aparte de algunos detalles técnicos, todo lo que hacía falta estaba en los *Principia*.

T: ¿Cuál es el número de fisiones espontáneas por unidad de tiempo para todas las sustancias antes mencionadas [uranio 235, uranio 238, plutonio 239, plutonio 240]?

B: La fisión espontánea es bastante insignificante y no debería tenérsela en cuenta en los cálculos. La vida media de la fisión espontánea es de unos 7000 años. No puedo darle una cifra más precisa, pero entenderá usted que con este valor de la vida media de la fisión espontánea no cabe esperar que afecte al proceso significativamente.

Comentario de los autores: Esta pregunta viene tras una serie de otras sobre los reactores y antes de una relativa al número de neutrones que se liberan en la fisión, que es importante tanto para los reactores como para las bombas. Por consiguiente, no está claro si la pregunta se refiere a aquéllos o a éstas. La respuesta de Bohr es correcta si se refiere al diseño de reactores, pero no para el diseño de

cedida a Enrico Fermi y otros científicos, muchos de ellos refugiados de Europa. Fermi había abandonado su Italia natal para instalarse en la Universidad de Columbia en enero de 1939. Su primer proyecto fue generar una reacción en cadena autoabastecida en el uranio natural, a pesar de que contenía muy poco uranio 235 fisionable; Fermi acabaría por conseguirlo en Chicago, en diciembre de 1942.

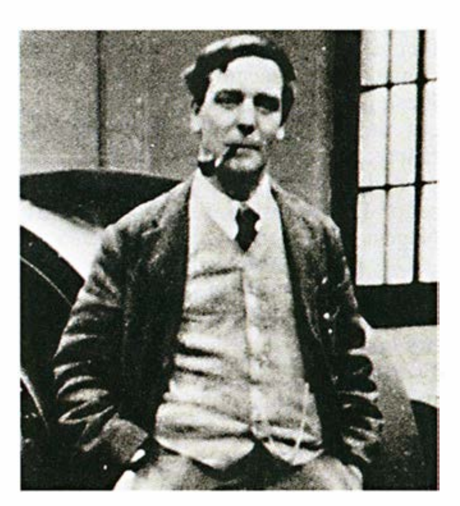
Pero ya antes físicos de Alemania, la Unión Soviética y Estados Unidos habían reparado en otro camino para llegar a la fabricación de bombas nucleares. Habían predicho, cada cual por su lado y en secreto, que la captura de un neutrón por el isótopo abundante, el uranio 238, podía hacer que éste se transformase en un elemento nuevo —al que ahora se llama plutonio—, que experimentaría la fisión inducida por neutrones con la misma facilidad que su isótopo raro, el uranio 235. Al ser un elemento distinto, cabe separar por medios químicos el plutonio del uranio en el que se ha producido, con lo que se evita el tortuoso problema de la separación de los isótopos. Resultó, además, que el reactor de uranio de Fermi también hacía plutonio. Este reactor se convirtió en el prototipo de la planta de producción del plutonio que se construiría en Hanford, Washington.

Volvamos a 1940. Mientras las investigaciones nucleares norteamericanas se concentraban aún en si se podría lograr un reactor nuclear operativo, las británicas desempeñaron un papel decisivo en la demostración de que el arma nuclear era un objetivo alcanzable. En marzo, Frisch y otro refugiado alemán, Rudolf Peierls, trabajando clandestinamente y sin el apoyo del gobierno en la Universidad de Birmingham, calcularon la cantidad mínima de uranio 235 puro que conduciría a una reacción en cadena explosiva. Llegaron al sorprendente resultado de que esa "masa crítica" era de sólo varios kilogramos.

Un memorándum hizo saber al gabinete de Winston Churchill sus cálculos y prometedoras ideas sobre la separación isotópica. El gabinete decidió impulsar las investigaciones encaminadas a la obtención de la bomba nuclear. La postura británica contribuyó a que el presidente Franklin D. Roosevelt se convenciese en 1942 de que debía crear el proyecto Manhattan. El esfuerzo estadounidense por desarrollar armas nucleares emplearía pronto a miles de personas en el laboratorio de ingeniería y construcción de armamento de Los Alamos, Nuevo México, así como en muchas otras instalaciones dispersas por la nación.

No queriendo dejar ninguna tecla sin tocar, los Estados Unidos siguieron la bomba, la ruta del plutonio y la del uranio. La primera concepción de la bomba que se consideró en el laboratorio de Los Alamos —el diseño de pistola— consistía en disparar dos masas subcríticas de uranio la una contra la otra para que se formase súbitamente una masa crítica. En la bomba que destruyó Hiroshima, el 6 de agosto de 1945, que se atenía a ese diseño, se empleó uranio 235 casi puro, separado del mineral con un coste inmenso.

Método que, sin embargo, no funcionaría con el plutonio. Cuando llegó a Los Alamos la primera muestra de ese material, se produjo una gran sorpresa. Se vio que mostraba una tendencia apreciable a fisionarse espontáneamente. Si se reunía la masa crítica mediante el diseño de pistola, los neutrones emitidos durante la fi-





2. SE CREE QUE LOS FISICOS Peter L. Kapitsa (*arriba*) y Lev D. Landau (*abajo*), amigos de Bohr, podrían haber sido la razón de que el danés hablase con los soviéticos. Antes de la guerra, Landau estuvo en prisión y a Kapitsa no se le había permitido volver a Inglaterra tras una visita a su familia. Parece que Bohr esperaba que el encuentro le diese la oportunidad de transmitir su apoyo a los dos científicos y la preocupación que sentía por ellos.

bombas. Como se explica detenidamente en el texto, para la bomba de plutonio era vital que se tuviera en cuenta la fisión espontánea, ya que requería un diseño completamente original.

T: ¿Con qué material se hicieron las bombas atómicas?

B: No sé con exactitud qué material se empleó en las bombas que se lanzaron sobre el Japón. No creo que haya un físico teórico que responda esa pregunta. Sólo los militares lo saben. Como científico, puedo decir que se hicieron bien con plutonio, bien con uranio 235.

Comentario de los autores: Muchos científicos con responsabilidades en Los Alamos (Bethe, por ejemplo) sabían qué materiales se empleaban, pero no ignoramos si ése era el caso de Bohr.

T: ¿Se usa la materia superdensa antes de la explosión de la bomba o bajo el impacto de la explosión?

B: No hay necesidad de eso. La cuestión es que las partículas de uranio se mueven durante la explosión a velocidades iguales a la de los neutrones. Si no fuese así, la bomba se desintegraría con una pequeña explosión sólo. Pero con una explosión, debida a la velocidad igual, el proceso de la fisión del uranio continúa después incluso de la explosión.

Comentario de los autores: La pregunta es confusa. Cabe suponer que se quería saber si la alta densidad del material fisible producido por la explosión química inicial era capaz de incrementar la reacción en cadena, y una contestación al respecto habría sido muy valiosa. Lo que se transcribe que Bohr dijo nos es incomprensible, y a los soviéticos tuvo que pasarles lo mismo.

sión espontánea iniciarían una reacción en cadena y se liberaría una cantidad de calor enorme, que desactivaría el dispositivo y dejaría sólo que se produjese una explosión pequeña.

Para detonar la bomba de plutonio se concibió un montaje radicalmente nuevo, mucho más difícil: el diseño de implosión. En esta técnica se usaba una esfera subcrítica de plutonio rodeada por explosivos ordinarios. Una explosión química comprimía el plutonio hasta una densidad mucho mayor que la que tiene en un ambiente normal. En virtud de esa gran densidad, la reacción en cadena progresaba muy deprisa. La compresión era tan rápida, que la fisión espontánea del plutonio no tenía tiempo para desactivar el dispositivo. El diseño de implosión se utilizó contra Nagasaki el 9 de agosto de 1945.

Dos días después de este segundo bombardeo, el gobierno de los Estados Unidos hizo público su informe oficial sobre el proyecto Manhattan. Escrito por Henry DeWolf Smyth, profesor de Princeton, el libro divulgó una gran cantidad de información, pero sirvió también a un importante propósito de seguridad. En el proyecto habían participado miles de personas, así que era fundamental que hubiera una definición inequívoca sobre lo que pertenecía al ámbito de los secretos militares y lo que estaba exento de esa salvaguarda. A este respecto, escribía tajante el general de división Leslie R. Groves, comandante militar del proyecto Manhattan, en el prefacio del documento: "No deben hacerse peticiones de información adicional."

Ni que decir tiene que los soviéticos se interesaron también por las armas nucleares durante la guerra. Gracias al libro de David Holloway *Stalin and the Bomb*, la interrelación entre la ciencia, el espionaje y la política que marcó este intento se ha conocido ahora en Occidente.

Desde mediados de los años treinta, un grupo de jóvenes investigadores del Instituto Politécnico de Leningrado, dirigido por Igor V. Kurchatov, se había inclinado por las cuestiones subatómicas. Así, Georgii N. Flerov, alumno de Kurchatov, fue el primero en confirmar la predicción de Bohr y Wheeler sobre la fisión espontánea del uranio, resultado que publicó en julio de 1940 en la norteamericana *Physical Review*.

Los teóricos soviéticos se contaban entre la avanzadilla mundial. En el Instituto de Química Física de Leningrado, Iulii B. Khariton y Iakov B. Zel'dovich (quien, con Andrei Sakharov, dirigiría el programa soviético de la bomba de hidrógeno durante la posguerra) efectuaron y publicaron estudios pioneros de la reacción de fisión en cadena en el uranio natural. En 1941, una vez se hubo impuesto el secreto, Khariton y Zel'dovich, como Frisch y Peierls antes que ellos, calcularon correctamente la masa crítica del uranio 235. (Sorprendentemente, los físicos alemanes nunca efectuaron este cálculo durante la guerra, a pesar de que la reputación de la ciencia alemana convenció a Churchill y a Roosevelt de que debían perseguir la construcción de la bomba a cualquier costo.)

Los físicos soviéticos llamaron la atención de su gobierno sobre el potencial militar de la fisión. Pero la URSS tuvo que enfrentarse a la invasión de Hitler en junio de 1941, y no pudo dedicar grandes recursos al incierto objetivo de conseguir la bomba atómica hasta que Alemania no fue derrotada.

El espionaje soviético fue, sin embargo, todo un éxito. En septiembre de 1941, agentes soviéticos se hicieron en Londres con un informe del gabinete británico basado en el memorándum de Frisch y Peierls; se lo facilitó, al parecer, un alto funcionario británico. El valor de esta información era incalculable, ya que además revelaba que el gabinete estaba decidido a colaborar con los Estados Unidos en las investigaciones sobre la bomba. Pocos meses después, Klaus Fuchs, físico comunista que había huido de la Alemania nazi y refugiado en Inglaterra, donde trabajaba con Peierls, se convirtió en la fuente primordial de los soviéticos. Fuchs les enviaba un informe técnico tras otro, primero desde Inglaterra y luego desde los Estados Unidos, cuando estuvo integrado en el equipo británico que participaba en el proyecto Manhattan. Entre esos documentos que remitía por afinidades políticas había explicaciones sobre la separación isotópica y los reactores nucleares. Aún más importante fue el que en junio de 1945 llegasen a manos soviéticas especificaciones detalladas de la bomba de implosión que luego se usaría en Nagasaki.

Por tanto, cuando el presidente Harry S. Truman, dos semanas antes del bombardeo de Hiroshima, le hizo a Stalin su famosa, velada alusión, "tenemos un arma nueva de una fuerza destructiva desconocida", se equivocó al suponer que Stalin no la entendió. Muy al contrario, Stalin ordenó rápidamente que se acelerasen los planes soviéticos de construcción de armas nucleares. Además, encargó la supervisión del proyecto a Lavrentii P. Beria, el célebre jefe de la policía secreta.

Beria infundía miedo a cuantos caían bajo su influencia. No se fiaba de nadie, ni de los físicos ni de los espías. Kurchatov, que dirigía las investigaciones científicas del programa desde el principio, era el único

experto que estaba enterado del espionaje nuclear. En 1945, sin embargo, Beria creó un pequeño grupo de científicos para que compilasen los ficheros del espionaje, que no paraban de crecer. Lo dirigió Iakov Terletskii, un joven físico de talla mucho menor que el equipo de Kurchatov, pero a quien Beria podía controlar a su antojo.

En noviembre de 1945 Terletskii, mandado por Beria, acudió a Copenhague con el fin de entrevistarse con Bohr, quien acababa de volver a su país tras haber tomado parte en el proyecto Manhattan. Según el memorándum remitido a Stalin, Beria planeó la misión con la esperanza de que Bohr, conocido abogado de la solidaridad internacional, diría algo de interés acerca de la investigación nuclear occidental. Indudablemente, Beria también creía que, si Bohr divulgaba algún secreto, de intento o sin querer, esa información serviría para verificar otras obtenidas por el espionaje y la investigación soviéticos; amén, quizá, de hacer a Bohr vulnerable al chantaje.

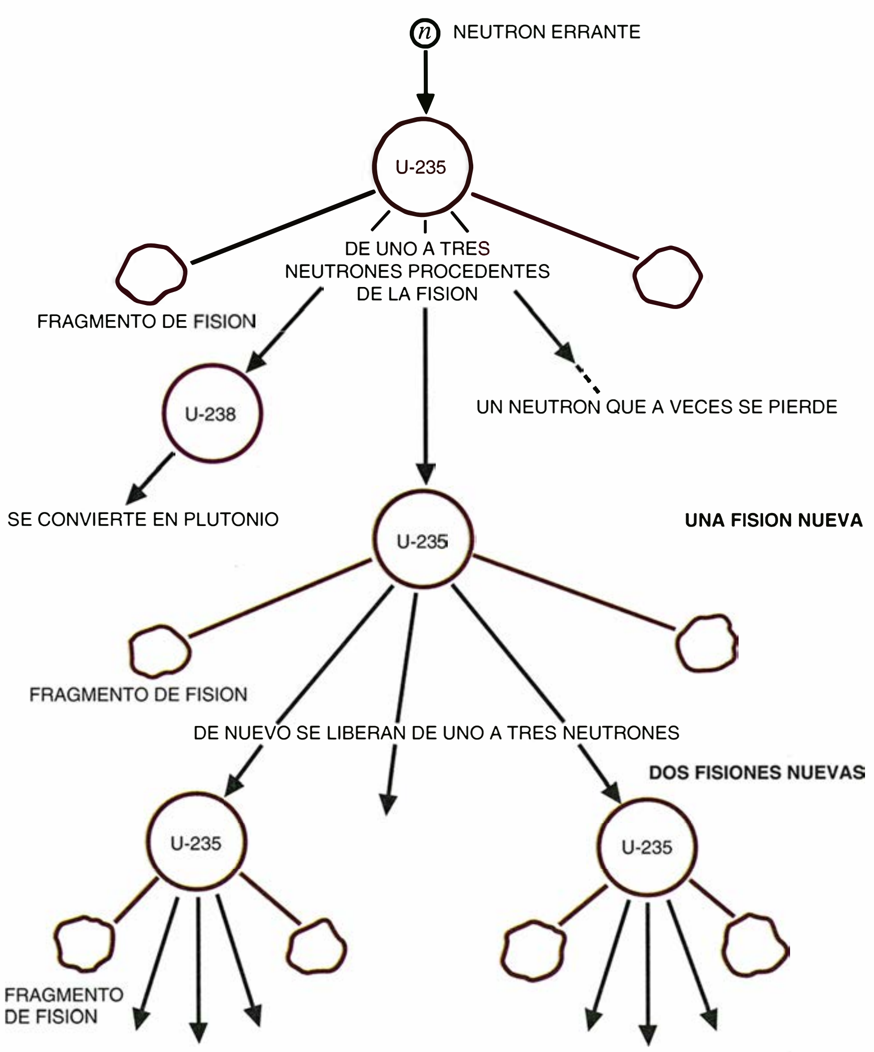
El 2 de noviembre, un miembro comunista del parlamento danés le pidió a Bohr que recibiera en secreto a Terletskii, portador de una carta de su viejo amigo Peter L. Kapitsa. Se trataba del físico experimental ruso más sobresaliente de su generación, a quien el gobierno soviético retenía, de hecho, cautivo.

Según Aage Bohr, premio Nobel e hijo de Niels, que también trabajó en Los Alamos y enseña hoy en la Universidad de Copenhague, su padre se quedó helado. Respondió que la cita constituía "un lamentable error", y le insistió al parlamentario danés que toda conversación tendría que ser abierta y que sólo hablaría de la información que estuviese disponible públicamente. Bohr notificó lo sucedido a las autoridades occidentales, y los británicos informaron a Groves del sospechoso contacto antes de que tuviese lugar el encuentro. Las autoridades expresaron su preocupación de que pudiera estar en marcha un intento de secuestrar a Bohr.

Con todo, el encuentro se celebró el 14 de noviembre. El gobierno danés se ocupó de proteger a Bohr. Otro hijo de éste, Ernest, que entonces tenía 21 años, permanecía en una estancia contigua, armado con una pistola. Las autoridades occidentales debían de sentir, seguramente, curiosidad por saber qué cosas preguntaría el agente soviético. Unos documentos del gabinete británico, a los que acaba de levantarse el secreto, demuestran que Bohr se mantuvo en contacto con la embajada británica las semanas anteriores a las conversaciones. Un cable enviado al máximo responsable del ministerio de asuntos exteriores británico comunicaba que Bohr estuvo un largo tiempo en la embajada el mismo día que se encontró por vez primera con Terletskii.

Hay dos relatos de esta cita entre Bohr y Terletskii, independientes el uno del otro, ambos de testigos presenciales, y concuerdan apreciablemente. Las memorias de Terletskii aparecieron en Rusia poco después de su muerte en 1993. Aage Bohr, que tenía 23 años por entonces, permaneció en la sala durante toda la reunión, por insistencia de su padre; recuerda con claridad qué ocurrió.

No se entendieron bien las dos partes. El traductor era un experto soviético en comercio internacional que no sabía física. Como pueden testificar dos de los autores (Bethe y Gottfried), Bohr tendía a bajar la voz, ya de por sí suave, cuando recalcaba un punto crucial, y costaba entenderle en inglés o alemán, aun cuando uno conociese bien el tema, lo que no era el caso de Terletskii. En sus memorias, éste reconoce que sólo comprendió muy por encima lo que Bohr decía, y que no se tomaron notas hasta que él y el intérprete no



3. LA REACCION EN CADENA que pone en marcha la fisión de un átomo de uranio en un reactor hecho de uranio mineral se describe en el informe Smyth, la publicación del proyecto Manhattan que editó el gobierno estadounidense. Como se muestra en esta ilustración, adaptación de una del documento, un neutrón errante (*arriba*) —procedente de la fisión de un núcleo de uranio 235 que no se representa— es capturado por otro núcleo de uranio 235, que se rompe en dos fragmentos y varios neutrones. Algunos de éstos son, a su vez, capturados por otros núcleos de uranio 235, que experimentan entonces la fisión (*centro*) y liberan neutrones que inducen nuevas reacciones de fisión (*abajo*). Si, en vez de eso, el uranio 238 absorbe los neutrones, se transforma en plutonio (*izquierda*). Cuando Bohr le dio el informe Smyth a Terletskii, los soviéticos habían acabado ya casi su traducción.

hubieron intentado reconstruir la conversación más tarde.

Según los dos relatos, Bohr se pasó buena parte de la cita hablando largo y tendido de Kapitsa y Lev D. Landau. Kapitsa había trabajado en Cambridge con Ernest Rutherford hasta 1934, año en que visitó a su familia en la URSS y Stalin ya no le dejó salir. Landau, teórico brillante, había trabajado durante algún tiempo en el Instituto de Física Teórica de Bohr, en Copenhague; antes de la guerra pasó un año en la cárcel condenado por Stalin. Bohr quería que su intercesión por ambos llegase a la cúspide del gobierno soviético a través del emisario de éste, Terlestskii.

Terletskii cuenta además que, para gran desaliento suyo, al llegar por fin la ocasión de preguntar lo que le interesaba saber, Aage seguía allí todavía. Aage lo confirma, y recuerda "a un Terletskii algo desesperado que, tras una larga conversación sobre Kapitsa... estaba ansioso por presentar una serie de preguntas. Se hicieron deprisa y por medio del intérprete, y no pudimos entender con todo detalle su contenido".

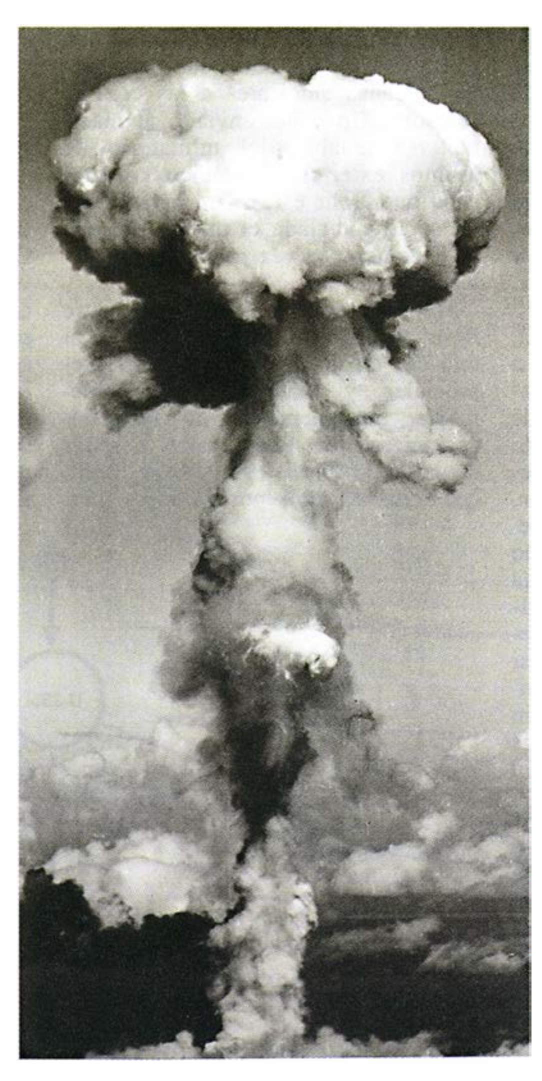
En una segunda y breve visita, Bohr le dio a Terletskii el informe Smyth. Por entonces ya se habían vendido 100.000 ejemplares del mismo, y la traducción del gobierno soviético estaba casi concluida.

Cuando Beria entregó a Stalin el memorándum sobre la misión de Terletskii, añadió una transcripción supuestamente literal de las preguntas de Terletskii y las respuestas de Bohr. Analizaremos ahora el contenido de este documento y dejaremos para más adelante si hay que tomárselo al pie de la letra.

Más de la mitad de las 22 preguntas de Terletskii (que habían sido preparadas por el equipo de Kurchatov) se referían a los reactores nucleares y a las técnicas de separación de isótopos, y varias a la fisión propiamente dicha y a los mecanismos detonadores de la bomba. Una de las cuestiones preguntaba por la posibilidad de que hubiera una defensa contra las armas nucleares.

La transcripción confirma las memorias de Terletskii, según las cuales "las respuestas [de Bohr] fueron muy generales. Cada vez decía que en Los Alamos no le habían contado los detalles ... [y] que nunca había visitado los laboratorios de la costa Este", donde se encontraban las instalaciones para la separación de isótopos del proyecto Manhattan. Lo cierto es que las respuestas de Bohr sobre los reactores nucleares y las técnicas de separación isotópica sólo daban una información que se conocía ya desde antes de la guerra, incluso en los casos en que el informe Smyth trataba con detalle desarrollos posteriores. (Cerca de la mitad del texto de dedicaba a estos asuntos.) Cuando se le preguntaba por la fisión misma, Bohr solía referirse a la bibliografía anterior a la guerra, en especial al famoso artículo que escribió con Wheeler.

Bohr, sin embargo, dio supuestamente una respuesta incorrecta al afirmar que ningún reactor de los Estados Unidos empleaba agua pesada como "moderador" para frenar los neutrones. En realidad, el reactor del laboratorio de Argonne, cerca de Chicago, sí usaba agua pesada, como se decía en el informe Smyth. No sabemos si este error menor es imputable a Bohr o a Terletskii.



4. ESTA EXPLOSION nuclear se produjo durante los experimentos realizados por los Estados Unidos en julio de 1946. La Unión Soviética probó por vez primera un arma nuclear en agosto de 1949.

Las preguntas de Terletskii relativas al diseño de la bomba merecen analizarse con atención. Cuando se le preguntó por el número de neutrones que emitían varios isótopos del uranio y del plutonio, Bohr se limitó a contestar "más de dos". Terletskii inquirió entonces: "¿Podría darme una cifra más exacta?", y Bohr respondió: "No, no puedo. ... El número exacto es irrelevante. ..." Pero la verdad es que la cantidad de uranio 235 o de plutonio necesaria para hacer una bomba tiene muchísimo que ver con el número de neutrones por fisión.

La segunda cuestión concerniente al diseño de la bomba se refería a la fisión espontánea, que, como ya hemos visto, reviste una importancia crucial a la hora de proyectar una bomba de plutonio. Pero no está claro si la pregunta de Terletskii se refería al diseño de bombas o al de reactores, y la respuesta de Bohr sólo era correcta para los reactores, en los que la fisión espontánea carece de relevancia. La última cuestión tenía que ver con la manera en que progresa la reacción en cadena cuando una explosión química comprime el material fisible. La respuesta de Bohr es un modelo de cómo decir algo ininteligible y que no viene a cuento.

Como Bohr no había participado en la separación de isótopos ni en el diseño de reactores durante el proyecto Manhattan, no estaba en condiciones de responder a las preguntas relacionadas con esos temas. Pero en el tiempo que pasó en Los Alamos, Feynman le instruyó sobre las reacciones en cadena de las bombas y participó en la elaboración del diseño de implosión. Si Bohr hubiese querido revelar informaciones vitales, estas cuestiones le habrían ofrecido la oportunidad de hacerlo. En cambio, a los soviéticos les dio respuestas parciales o incomprensibles que no explicaban nada.

En su respuesta a la pregunta de si era factible alguna defensa contra la bomba, Bohr se explayó sobre la necesidad de un control internacional, postura que mantenía coherentemente en público. Pero la que se supone fue su respuesta contiene, además, una afirmación absurda, que "el gran Oppenheimer se ha retirado en señal de protesta y ha dejado de trabajar en el proyecto". Si bien es verdad que J. Robert Oppenheimer abandonó Los Alamos para volver a Berkeley, también lo es que se con-

virtió en el asesor técnico más influyente de la administración Truman en política de armas nucleares.

Por si fuese poca la reserva con que debe tomarse cualquier documento firmado por Beria, la presunta frase de Bohr sobre Oppenheimer nos convence de que sus respuestas fueron "maquilladas" a medida que se acercaban al despacho de Stalin. Terletskii recuerda en sus memorias que el coronel de la policía secreta que estuvo a cargo de la misión de Copenhague le aleccionó acerca de cuál era la mejor forma de transmitir lo que había oído. A pesar de estos esfuerzos, a Beria le defraudaron los resultados, y cuando Terletskii le informó de las conversaciones con Bohr "perdió el control e interrumpió con obscenidades dirigidas contra Bohr y los norteamericanos".

Sin embargo, en el memorándum que mandó al zar rojo, Beria daba a entender que la misión de Terletskii había sido un éxito. Nos parece interesante que el memorándum no mencione nunca el informe Smyth, y se ve que no se contrastó con él. Beria y su gente sospecharían que un documento tan pormenorizado era una obra maestra de la desinformación. Por tanto, no podemos despreciar la afirmación de Terletskii de que Bohr, al aportar el informe Smyth, le dio una credibilidad de la que si no habría carecido.

Por mucho que Terletskii y otros que trabajasen para Beria alteraran las palabras de Bohr, la versión más autorizada del encuentro de que se dispone es el memorándum remitido a Stalin. El propósito de cualquier alteración habría sido exagerar la importancia de la información suministrada por Bohr. Pero en la transcripción el danés no aporta ningún dato de interés técnico o militar que no figure en el informe Smyth. En consecuencia, la acusación de que compartió secretos nucleares con los soviéticos queda refutada por la descripción que el propio Beria hizo del encuentro entre su agente y Bohr.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SPECIAL TASKS: THE MEMOIRS OF AN UNWANTED WITNESS: A SOVIET SPY-MASTER. Pavel y Anatoli Sudoplatov, con Jerrold L. y Leona P. Schecter. Little, Brown and Co., 1994.

STALIN AND THE BOMB. David Holloway. Yale University Press, 1994.

WERE THE ATOMIC SCIENTISTS SPIES? Thomas Powers en *New York Review of Books*, vol. 41, n.º 11, págs. 10-17; 9 de junio de 1994.

¿Qué le contó Heisenberg a Bohr sobre la bomba atómica?

En 1941, Werner Heisenberg y Niels Bohr mantuvieron una entrevista a solas en Copenhague. Dos años después, Bohr enseñaba en Los Alamos un supuesto bosquejo de un arma nuclear ideada por Heisenberg

Jeremy Bernstein

A principios de septiembre de 1943, Niels Bohr se enteró de que la Gestapo de Copenhague se proponía arrestarlo. Pocas semanas después, el día 29, él, su esposa y unos cuantos más acudían, amparados por la obscuridad de la noche, a una playa de las afueras de Carlsberg, para huir de Dinamarca. Se embarcaron y cruzaron el Øresund, rumbo a Suecia. El 6 de octubre, volaba desde allí hacia Escocia. Ese mismo día se trasladó a Londres y, al caer la jornada, se reunía con sir John Anderson, el químico físico que estaba al cargo del incipiente proyecto británico de la bomba atómica. Anderson le puso al corriente del proyecto anglo-americano. Según su hijo Aage, que le siguió a Inglaterra una semana después y fue su ayudante durante la guerra, Bohr se quedó muy sorprendido —conmocionado sería un calificativo más apropiado— por lo lejos que había llegado ya el programa anglo-americano.

El sobresalto de Bohr se debió seguramente a una doble razón. La primera, su propia trayectoria teórica. Durante los años treinta, cuando la física nuclear se estaba desarrollando, había dicho y repetido que era de todo punto imposible que la energía nuclear tuviera aplicaciones prácticas. Opinión que se consolidó cuando descubrió, en la primavera de 1939, un aspecto notable de la fisión del uranio. En diciembre de 1938, Otto Hahn y Fritz Strassmann habían descubierto que el bombardeo del uranio con neutrones podía fisionarlo. (Lise Meitner, que había sido ayudante de Hahn, y su sobrino Otto Frisch conjeturaron que el núcleo de uranio había llegado realmente a escindirse en el experimento, y por eso acuñaron la palabra "fisión" para nombrar el proceso.) En el experimento se usó uranio natural, el 99 por ciento del cual está en la forma del isótopo 238. Unas siete décimas de tanto por ciento son del isótopo uranio 235, cuyo núcleo contiene tres neutrones menos.

Los isótopos no pueden distinguirse por medios químicos. Bohr halló que, a causa de las diferencias estructurales entre isótopos, sólo el rarísimo uranio 235 se había fisionado en los experimentos de Hahn y Strassmann. Así llegó a la conclusión de la imposibilidad práctica de fabricar un arma nuclear, operación que exigía la separación de tales isótopos, una tarea titánica. En diciembre de 1939 afirmaba en una conferencia: "Con los medios técnicos actuales resulta imposible purificar el isótopo de uranio raro en cantidad suficiente para producir la reacción en cadena." Se entiende, pues, muy bien que a Bohr le impresionase oír, cuatro años después, que justo eso era lo que los aliados se proponían.

El segundo motivo del sobresalto de Bohr se remontaba a un encuentro que tuvo con Werner Heisenberg a mediados de septiembre de 1941, dos años antes de su huida de Copenhague. Los alemanes llevaban ya un año largo en Dinamarca. A lo largo de ese intervalo, las fuerzas de ocupación habían establecido en la capital el Instituto Cultural Alemán, con el objeto de convertirlo en foco de irradiación propagandística del Tercer Reich. Entre sus actividades, el instituto organizaba reuniones científicas. Heisenberg fue uno de los varios expertos alemanes que acudieron a Copenhague bajo sus auspicios, en su caso a una reunión de astrónomos. Conocía a Bohr desde 1922. Había pasado bastante tiempo en el instituto que éste había fundado en Copenhague; allí, Bohr había sido algo así como la musa que inspiró la creación de la teoría cuántica. Heisenberg volvía ahora como representante de una odiada fuerza de ocupación, y cantaba, según algunos testimonios, a los cuatro vientos la convicción de su victoria.

Heisenberg pasó una semana en Copenhague y visitó el instituto de Bohr en varias ocasiones. En una de esas visitas, habló con su viejo maestro en privado. No parece que ninguno de los dos tomase notas, así que no podemos estar seguros de qué se dijeron. Además, Bohr no sabía escuchar y parece verosímil que la velada fuera un diálogo de sordos. De cualquier modo, Bohr salió con la impresión clara de que Heisenberg estaba trabajando sobre armas nucleares. Aage Bohr lo recordaría más tarde: "Heisenberg sacó la cuestión de la aplicación militar de la energía atómica. Mi padre tenía muchas reservas al respecto y expresó su escepticismo, debido a las grandes dificultades técnicas que había que superar, pero tuvo la impresión de que Heisenberg creía que las nuevas posibilidades decidirían el resultado de la guerra si ésta se prolongaba."

Dos años después, Bohr se enteraba de que los aliados tenían un programa de armas nucleares. ¿Qué no habrían hecho los alemanes durante esos dos años? No es extraño que Bohr se alarmase.

Sería apasionante saber con detalle qué quería decir eso de "nuevas posibilidades". Pero tenemos pistas para adivinarlo. En los años cuarenta los físicos de las dos partes del conflicto repararon en que, aparte de la fisión del uranio, había otra vía que desembocaba también en la consecución

JEREMY BERNSTEIN enseña física en el Instituto Stevens de Tecnología y en la Universidad Rockefeller.



1. WERNER HEISENBERG Y NIELS BOHR, a los que aquí se ve en una fotografía de 1936, tuvieron un curioso encuentro cinco años más tarde. Algunos conjeturan que los dos físicos —por entonces en bandos opuestos de la guerra— hablaron de las armas nucleares. Cuando Bohr llegó al laboratorio de Los Alamos a finales de 1943, se dice que tenía el bosquejo de un proyecto de bomba nuclear —eso creía él— ideado por Heisenberg. Si fue así, el dibujo debió de parecerse, con toda seguridad, al diseño de reactor que se muestra a la derecha.

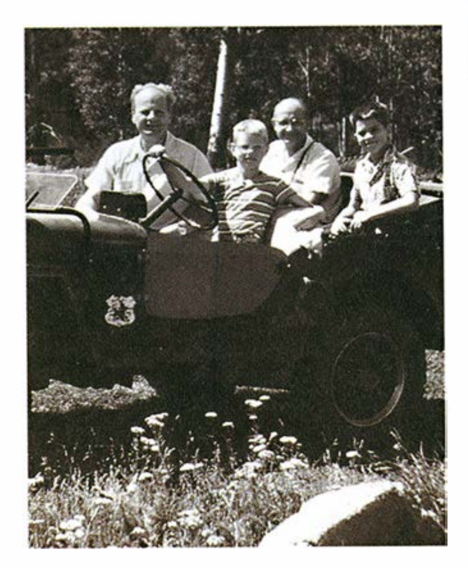
del arma nuclear: utilizar lo que más tarde vendría a llamarse plutonio. Este elemento, algo más pesado que el uranio, posee propiedades químicas diferentes; ahora bien, gracias a su estructura nuclear es, por lo menos, tan fisible como el uranio. No existe, sin embargo, en la naturaleza y hay que fabricarlo en un reactor nuclear mediante el bombardeo, con neutrones, de las varillas de combustible de uranio del reactor. Una vez conseguido, se puede separar, por medios químicos, el plutonio del uranio del que procede.

Desde el momento en que se conoció este proceso, todos los reactores se convirtieron, en cierto sentido, en componentes de un arma nuclear. Heisenberg lo sabía cuando visitó a Bohr. Hasta disertó sobre ello —los textos se han conservado— ante altos cargos alemanes. ¿Era eso lo que intentaba decirle a Bohr? Y si fue así, ¿por qué?

Este magno rompecabezas tiene por corolario otro menor. Hay razones para creer que en el encuentro de Copenhague Heisenberg le dio a Bohr un dibujo. No está claro si Heisenberg hizo el dibujo durante la reunión o lo traía ya. A tenor de la forma de proceder de los físicos, supongo que garabatearía el dibujo sobre la marcha para transmitir mejor su idea. En cualquier caso, en unas circunstancias que describiré enseguida, este dibujo, o una copia, llegó al laboratorio de Los Alamos en diciembre de 1943, donde causó un revuelo considerable: daba la impresión de que contenía información directa de la manera en que los alemanes planeaban construir armas nucleares. Antes de que cuente cómo llegó el dibujo a Los Alamos, déjenme que les explique cómo me enteré de su existencia. Una cosa tiene que ver con la otra.

En noviembre de 1977 comencé una serie de entrevistas con Hans Bethe. Estas sesiones duraron, intermitentemente, dos años, y de ellas salieron las tres partes de un retrato del personaje para la revista *New Yorker* y un libro que se publicó a continuación. Las entrevistas, que grabé en cinta, seguían la vida de Bethe por orden cronológico. Bethe nació en Estrasburgo en 1906 y emigró a los Estados Unidos en 1935, donde ha permanecido desde entonces, en la Universidad de Cornell. Adquirió la ciudadanía norteamericana en 1941; en ese momento, recuerda, estaba "desesperado por hacer algo por arrimar el hombro en la guerra". Lo mismo que Bohr, no creía que hubiera posibilidad práctica alguna de fabricar armas nucleares, y se dedicó a trabajar en el desarrollo del radar en el Instituto de Tecnología de Massachusetts.

En el verano de 1942, J. Robert Oppenheimer promovió la integración de un grupo de estudio en la Universidad de California en Berkeley para investigar las armas nucleares. Bethe pasaba entonces por ser uno de los teóricos nucleares más sólidos del mundo. Oppenheimer le invitó a colaborar. De camino a California en tren, Bethe se detuvo en Chicago para recoger a Edward Teller. Allí tuvo la oportunidad de contemplar el reactor nuclear de Enrico Fermi, todavía en fase de desarrollo. "Se convenció —confesará— de que el proyecto de la bomba atómica iba en serio y de que seguramente funcionaría." Consagró el verano al estudio de la teoría de armas nucleares, y en abril de 1943 fue a Los Alamos, cuyo laboratorio acababa de abrirse. Dirigiría su división teórica.

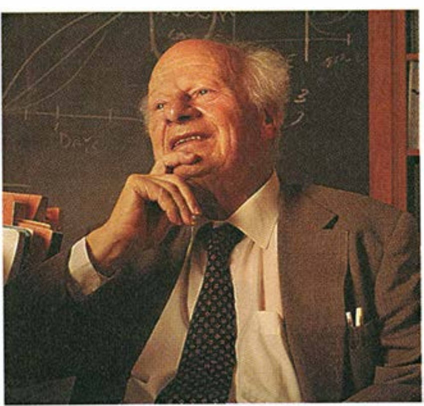


Volvamos al dibujo en cuestión. El 29 de noviembre de 1943 Bohr y su hijo Aage zarparon a bordo del *Aquitania*, rumbo a Nueva York. Llegaron el 6 de diciembre. A Bohr se le asignó el nombre en clave de Nicholas Baker, y Aage se convirtió en James Baker. El 28 de diciembre, tras haber celebrado varias reuniones de alto nivel —entre ellas, con el general de división Leslie R. Groves, militar al frente del proyecto Manhattan—, Bohr partió hacia Los Alamos. El día 31, se supone que nada más pisar el laboratorio, se reunió con un grupo selecto de físicos. El propósito principal de esta reunión era que Bohr comentase lo que sabía de los progresos alemanes en armas nucleares, en concreto qué le había transmitido Heisenberg.

Durante una de mis entrevistas con Bethe, éste me habló del dibujo: "Heisenberg le dio a Bohr un esquema. El dibujo nos lo pasó Bohr a nosotros más tarde, en Los Alamos. Era claramente el dibujo de un reactor. Pero nuestra conclusión fue, al verlo, que esos alemanes estaban completamente locos: ¿Es que quieren tirar un reactor sobre Londres?" Sólo una vez terminada la guerra se enteraron los científicos de Los Alamos de que los alemanes sabían muy bien, al menos en principio, qué hacer con un reactor: utilizarlo para fabricar plutonio. Pero a Bohr le preocupaba que alguien pudiese usar el reactor como un arma.

"Estoy completamente seguro de que hubo un dibujo... me produjo una gran impresión."

—Bethe

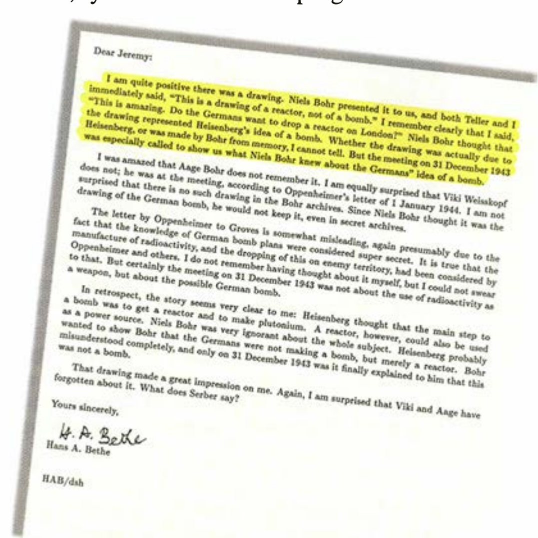


2. HANS BETHE recuerda con claridad que vio en Los Alamos, en 1943, un dibujo esquemático atribuido a Heisenberg. El año pasado le escribió al autor acerca de este recuerdo (*derecha*). A la izquierda, Bethe aparece sentado delante de Enrico Fermi, quien diseñó en Chicago el primer reactor operativo.

Hasta que lo señalé en el *New Yorker* nadie había mencionado por escrito el tal dibujo. En realidad, mi artículo sobre Bethe se cita con frecuencia como fuente de este curioso episodio marginal de la relación entre Bohr y Heisenberg. Me vi, pues, convertido en una especie de pie de nota de un pie de nota de la historia. Pero mi autoridad se vio amenazada a principios de 1994. Abraham Pais, biógrafo tanto de Einstein como de Bohr y profesor emérito de física de la Universidad Rockefeller, me llamó a su despacho. Hacía cuarenta años que conocía a Pais, pero no le había visto últimamente. Me habló de una llamada que había recibido unos cuantos meses antes.

La hizo Thomas Powers, que por entonces estaba escribiendo *Heisenberg's War*. Powers conocía el dibujo por mi libro sobre Bethe. Le chocó que pareciese que Heisenberg le había dado a Bohr, en plena guerra, un dibujo de un proyecto militar alemán secretísimo. Era tan impensable que Heisenberg hiciera algo así, que Powers quiso comprobar el asunto. Se puso en contacto con Aage Bohr en Copenhague (su padre murió en 1962). En una carta fechada el 16 de noviembre de 1989, Aage había escrito: "Heisenberg no esbozó ningún reactor durante su visita de 1941. No se habló en absoluto del funcionamiento de un reactor."

Sorprendido, Powers se puso en contacto con Bethe, quien le repitió lo mismo que me había dicho a mí hacía diez años. Perplejo, llamó a Pais, y ahora Pais me preguntaba a mí. Pero Pais había investigado por su cuenta. Había hablado con Aage, y éste insistió de nuevo en que nunca había habido semejante dibujo. Buscó también en los archivos de Copenhague donde se guardan todos los papeles privados y diarios de Bohr. En ninguna parte, me dijo, había encontrado la menor mención del dibujo.



Dear Jeremy:

I am quite positive there was a drawing. Niels Bohr presented it to us, and both Teller and I immediately said, "This is a drawing of a reactor, not of a bomb." I remember clearly that I said, "This is amazing. Do the Germans want to drop a reactor on London?" Niels Bohr thought that the drawing represented Heisenberg's idea of a bomb. Whether the drawing was actually due to Heisenberg, or was made by Bohr from memory, I cannot tell. But the meeting on 31 December 1943 was especially called to show us what Niels Bohr knew about the Germans" idea of a bomb.

I was amazed that Aage Bohr does not remember it. I am equally surprised that Viki Weisskopf does not; he was at the meeting, according to Oppenheimer's letter of 1 January 1944. I am not surprised that there is no such drawing in the Bohr archives. Since Niels Bohr thought it was the drawing of the German bomb, he would not keep it, even in secret archives.

The letter by Oppenheimer to Groves is somewhat misleading, again presumably due to the fact that the knowledge of German bomb plans were considered super secret. It is true that the manufacture of radioactivity, and the dropping of this on enemy territory, had been considered by Oppenheimer and others. I do not remember having thought about it myself, but I could not swear to that. But certainly the meeting on 31 December 1943 was not about the use of radioactivity as a weapon, but about the possible German bomb.

In retrospect, the story seems very clear to me: Heisenberg thought that the main step to a bomb was to get a reactor and to make plutonium. A reactor, however, could also be used as a power source. Niels Bohr was very ignorant about the whole subject. Heisenberg probably wanted to show Bohr that the Germans were not making a bomb, but merely a reactor. Bohr misunderstood completely, and only on 31 December 1943 was it finally explained to him that this was not a bomb.

That drawing made a great impression on me. Again, I am surprised that Viki and Aage have forgotten about it. What does Serber say?

Yours sincerely,

H. A. Bethe
Hans A. Bethe

HAB/dsh

Le prometí a Pais que yo mismo indagaría el asunto, pero la verdad era que, al salir de su despacho, no tenía ni la más vaga idea de qué iba a hacer. Ponerme en contacto con Bethe otra vez no me serviría de mucho. Nada podía ser más directo que lo que me había dicho a mí y repetido a Powers. Necesitaba otros testigos. Pero ¿quiénes? Oppenheimer había muerto. Niels Bohr había muerto. Groves había muerto. ¿Quién más podría haber visto ese dibujo?

En realidad, empecé con menos información que la que le he dado hasta aquí al lector. Todo lo que Bethe me dijo fue que Bohr había "transmitido" un dibujo a Los Alamos.

No contó ningún detalle concreto de la reunión del 31 de diciembre; al principio, pues, no tenía ni idea de quién podría haber estado allí; la verdad es que ni siquiera tenía la fecha concreta. Todo eso lo supe después. Pero conocía a algunos físicos que habían estado por entonces en Los Alamos y que podrían haber visto el dibujo o haber oído hablar de él. Dos se me pasaron por las mientes. Uno era Victor Weisskopf, que había colaborado con Oppenheimer.

El otro era Rudolf Peierls. Peierls y Otto Frisch lograron en marzo de 1940 el primer cálculo correcto —en principio— de la cantidad de uranio 235, o la masa crítica, necesaria para hacer una bomba. (Que esa masa resultase ser de sólo unos kilos y no



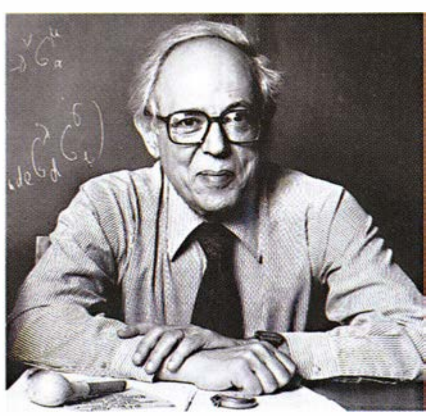
de varias toneladas es lo que de verdad puso en marcha la empresa aliada.) Peierls, con Frisch, estuvo en Los Alamos hasta principios de 1944. Conozco a Peierls desde hace muchos años y he repasado con él la historia de las armas nucleares. Le escribiría. Me contestaron los dos.

Peierls respondió que no había visto nunca el "famoso bosquejo", pero no creía que Bethe o Aage Bohr mintiesen. Suponía que Niels quizás evitó que su familia conociera un documento tan delicado o que Heisenberg sólo le hubiese enseñado el bosquejo a Bohr, quien lo habría vuelto a dibujar más tarde. Me sugirió que le preguntase a Bethe por esta posibilidad. Weisskopf también me propuso que hablase otra vez con Bethe, pues tampoco él había visto el dibujo u oído hablar de él.

Estaba claro que tenía que escribir a Bethe para contarle lo que había sabido y ver si él podría arrojar más luz sobre la situación. Pero entonces me vino una inspiración. Llamaría a

"[Nada] ha cambiado la serena y firme opinión de Aage: nunca hubo un dibujo."

—Pais



3. ABRAHAM PAIS le preguntó a Aage Bohr, uno de los hijos de Niels Bohr, si Heisenberg le había dado a su padre un dibujo en 1941. Aage Bohr (*a la izquierda*) estaba al tanto de las actividades de su padre; fue su ayudante durante la guerra. Pais le escribió al autor el verano pasado (*derecha*) que Aage Bohr estaba seguro de que Heisenberg no hizo ningún dibujo para su padre.

Robert Serber, profesor emérito de física de la Universidad de Columbia. Tras recibir el doctorado en 1934 en la de Wisconsin, empezó a trabajar con Oppenheimer en Berkeley. Tras un breve intermedio en la Universidad de Illinois, de 1938 a 1942, volvió a Berkeley para trabajar en la bomba con Oppenheimer. Estaba allí en el verano de 1942, cuando Bethe y Teller llegaron. En marzo de 1943 se trasladó, con la primera remesa de científicos, a Los Alamos. Una de sus primeras tareas fue dar una serie de clases de introducción a la física de la bomba. Estas lecciones se recogieron en lo que vino a llamarse *The Los Alamos Primer*, materia reservada hasta 1965 y publicado en su integridad en 1992.

En Serber hallé una mina de oro. No sólo se acordaba del dibujo vívidamente, sino que también recordaba las circunstancias precisas en las que lo había visto. El 31 de diciembre se le llamó al despacho de Oppenheimer, donde se estaba celebrando una reunión. Oppenheimer le enseñó un dibujo sin más explicaciones y le pidió que le dijese qué era. A Oppenheimer le gustaban ese tipo de juegos intelectuales. Serber lo miró, y afirmó rotundo que se trataba de un reactor. Oppenheimer le contestó que, en efecto, era el dibujo de un reactor y que se lo había dado Bohr al grupo allí reunido. Bohr, que estaba, recuerda Serber, de pie junto a Oppenheimer, no disintió.

Eso es lo que Serber me contó. Pero me dijo también que tenía material escrito relacionado con aquella reunión. Recibí las copias de dos documentos: una carta de Oppenheimer al general Groves enviada el día siguiente a la reunión y un memorándum de dos páginas escrito por Bethe y Teller sobre la capacidad explosiva del reactor. Por desgracia, aunque eran muy sugestivos, no zanjaban el asunto por completo, o al menos no me lo pareció la primera vez que los leí. El memorándum de Bethe y Teller contenía pistas significativas. La carta de Oppenheimer no mencionaba el dibujo, ni a Heisenberg ni a los alemanes. Pero la última frase daba claramente a entender que Bohr le había hablado a Groves en Washington de esos asuntos. Puede que haya algo esclarecedor en los archivos de Groves.

Dear Jeremy

It has taken some time for Aage Bohr and me to get together because (a) I was a traveling lecturer, Jerusalem, Odense, Amsterdam (b) He was busy with the book by Pseudoplato, as I call him.

Now then: We have discussed the letters, especially Groves to RO, 1/1/44 —which is actually also in the files here + a memo by Bethe + Teller, enclosed. Aage has also listened to the Bethe tape.

None of which has changed Aage's calm & firm opinion that there never was a drawing Hberg gave to Bohr in 1941. Whatever may have transpired at Los Alamos cannot be attributed to what took place in 1941 between HG and B. Aage will not mind if you contact him directly but, frankly, I see no point in doing so.

Mission accomplished.

All best, Bram

cc to Aage Bohr.

Mientras tanto, le había escrito a Bethe. Me contestó: "Estoy completamente seguro de que hubo un dibujo. Bohr nos lo enseñó, y tanto Teller como yo dijimos inmediatamente: 'Eso es el dibujo de un reactor, no de una bomba.' ... Si el dibujo era de verdad de Heisenberg o si lo hizo de memoria Bohr, no puedo decirlo. Pero la reunión del 31 de diciembre de 1943 se convocó especialmente para enseñarnos lo que Niels Bohr sabía de las ideas de los alemanes acerca de la bomba."

Bethe ofrecía una teoría para explicar el misterio: "Heisenberg pensaba que el paso principal hacia la bomba era conseguir un reactor y

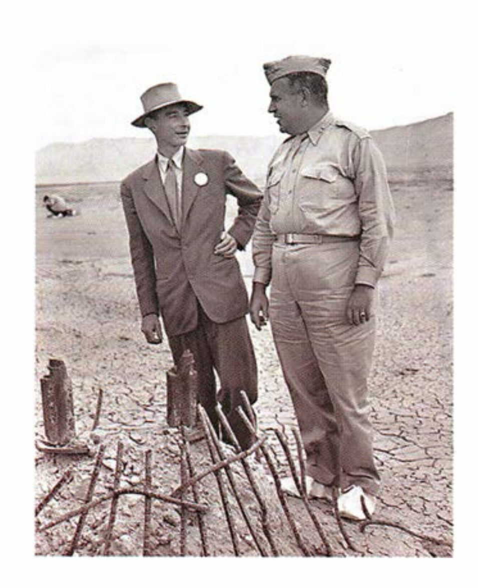
fabricar plutonio. Un reactor, sin embargo, también podía usarse como fuente de energía. Niels Bohr era muy ignorante en estas materias. Heisenberg quiso, seguramente, mostrarle a Bohr que los alemanes no estaban haciendo una bomba, sino un reactor. Bohr lo entendió todo al revés, y sólo el 31 de diciembre de 1943 se le explicó por fin que eso no era una bomba. Ese dibujo me produjo una gran impresión. Y me vuelve a sorprender que Viki [Weisskopf] y Aage lo hayan olvidado. ¿Qué dice Serber?"

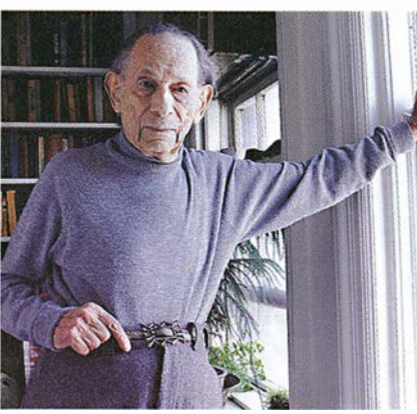
Ya podía escribirle a Bethe y contarle lo que Serber había dicho. Escribí también a Teller pidiéndole que contara lo que recordase de la reunión. No me contestó. Pero le escribí otra vez a Weisskopf y le envié unas copias de los memorándums de Serber. El 23 de febrero recibí una carta de Weisskopf en la que reconocía que vio el bosquejo pero que luego lo olvidó.

Ya tenía, pensaba, material suficiente para visitar otra vez a Pais. Le puse la cinta en la que había grabado a Bethe y le di copias de todos los documentos. Estaba él a punto de volver a Copenhague, donde pasa alrededor de la mitad del año con su esposa danesa. Me prometió que hablaría con Aage. Lo hizo a finales de junio. El día treinta me escribió contándome qué había ocurrido. Pais y Aage Bohr se habían visto, comentaron las cartas y revisaron las cintas. Aage Bohr seguía estando seguro de que Heisenberg no le dio nunca ese dibujo a su padre. Así que escribí a Aage directamente. En febrero de este año su ayudante, Finn Aaserud, me notificaba: "Aage Bohr mantiene que es de todo punto imposible que Bohr llevase consigo a los Estados Unidos un dibujo procedente de la reunión con Heisenberg de 1941, y la discusión de Los Alamos a la que usted se refiere no tiene nada que ver en absoluto con la reunión de 1941."

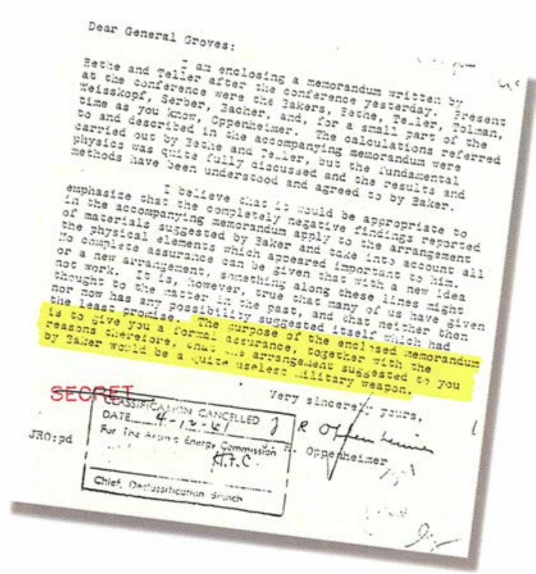
"...el [dispositivo] que sugiere... Baker sería totalmente inútil como arma militar."

—Oppenheimer





4. ROBERT SERBER no sólo recordaba que vio un dibujo el 31 de diciembre de 1943, sino que guardaba además varios documentos reveladores. Hizo llegar al autor una carta (*derecha*) de J. Robert Oppenheimer al general de división Leslie R. Groves (*se les ve a ambos a la izquierda*). En ella, Oppenheimer le aseguraba a Groves que la "manera de disponer los materiales" que Baker (el nombre en clave de Bohr) había descrito no serviría para un arma.



Dear General Groves:

I am enclosing a memorandum written by Bethe and Teller after the conference yesterday. Present at the conference were the Bakers, Bethe, Teller, Tolman, Weisskopf, Serber, Bacher, and, for a small part of the time as you know, Oppenheimer. The calculations referred to and described in the accompanying memorandum were carried out by Bethe and Teller, but the fundamental physics was quite fully discussed and the results and methods have been understood and agreed to by Baker.

I believe that it would be appropriate to emphasize that the completely negative findings reported in the accompanying memorandum apply to the arrangement of materials suggested by Baker and take into account all the physical elements which appeared important to him. No complete assurance can be given that with a new idea or a new arrangement, something along these lines might not work. It is, however, true that many of us have given thought to the matter in the past, and that neither then nor now has any possibility suggested itself which had the least promise. The purpose of the enclosed memorandum is to give you a formal assurance, together with the reasons therefore, that the arrangement suggested to you by Baker would be a quite useless military weapon.

Very sincerely yours,

J. R. Oppenheimer

JRO:pd

~~SECRET~~

CLASSIFICATION CANCELLED
DATE 4-12-61
For the Atomic Energy Commission
Chief, Declassification Branch

Me encontraba desconcertado. Hasta que, al mirar otra vez el memorándum que Bethe y Teller les prepararon a Oppenheimer y a Bohr, y en última instancia a Groves, me saltó de pronto a la vista la huella, manifiesta como un dolor de muelas, de Heisenberg en la primera frase del segundo párrafo del informe. Dice: "La pila [reactor] propuesta está formada por unas láminas de uranio inmersas en agua pesada." En otras palabras, Bethe y Teller no estaban considerando algún viejo diseño de reactor, sino uno muy particular que Bohr les había descrito. Ese diseño es, en realidad, el del reactor defectuoso que Heisenberg ideó a finales de 1939 y principios de 1940, y al que permaneció fiel ¡casi hasta el final de la guerra!

No cabe imaginar que Bohr, en las pocas semanas transcurridas entre el momento en que se enteró del proyecto de los aliados y el día en que llegó a Los Alamos, crease un diseño propio que presentaba los mismos fallos que el de Heisenberg. Tuvo que sacar la idea de éste, bien fuese verbalmente, bien gracias a un dibujo. ¿De qué otra parte podría haber salido si no?

Me explicaré. Todo reactor requiere elementos combustibles —el uranio— y un moderador, un dispositivo que amortigua la velocidad de los neutrones que dan en el combustible. Los neutrones que se mueven a una velocidad cercana a la del sonido son muchísimo más eficaces en causar la fisión que los neutrones rápidos que la propia fisión genera. Los elementos combustibles del reactor, pues, han de estar inmersos en el moderador. Pero el ingeniero debe saber escoger el material con el que se preparará el moderador y la manera en que se dispongan los elementos combustibles dentro del mismo. Lo último requiere ciencia y maña a la vez.

El uranio puede absorber neutrones sin que se produzca la fisión. Esa absorción se hará más intensa cuanto más se reduzca la velocidad de los neutrones. Si no se ha pensado bien la geometría de los elementos combustibles, el uranio absorberá tantos neutrones que jamás se producirá una reacción nuclear en cadena. El diseño más eficiente es el que, dentro del moderador, inserta en una retícula porciones de uranio separadas. El tamaño de esas porciones y la manera concreta en que se las disponga son cosa de maña. Pero no hay solución peor que poner el uranio en láminas o capas.

Fijémonos en lo que Bethe y Teller habían escrito: "La pila propuesta está formada por unas láminas de uranio." Heisenberg eligió precisa-

mente ese diseño porque con él los cálculos a realizar resultaban más fáciles que con cualquier otro. A continuación viene el asunto del moderador. Bethe y Teller decían que las láminas habían de estar "inmersas en agua pesada." Esta especificación, una vez explicada, también lleva escrita encima "Heisenberg" de cabo a rabo. El papel del moderador, como ya he dicho, consiste en frenar los neutrones procedentes de las fisiones. Los materiales idóneos para ello son los más ligeros porque la colisión de un neutrón con un objeto que tenga una masa parecida a la suya es la que causa mayor pérdida de energía. Si el neutrón choca con un objeto más pesado rebota y su dirección pasa a ser otra, pero su velocidad no cambia.

Si sólo hubiese que tener en cuenta la masa, el moderador ideal sería el hidrógeno, cuyo núcleo es un solo protón de masa muy similar a la del neutrón. Pero el hidrógeno no sirve como moderador, porque absorbe neutrones. En cambio, el "hidrógeno pesado", cuyo núcleo tiene un neutrón extra, no los absorbe. El hidrógeno pesado se encuentra en el "agua pesada". Pero en el agua del mar, por ejemplo, esa agua pesada es sólo una parte en 5000. Para usarla como moderador había que separarla del agua ordinaria, proceso caro y difícil.

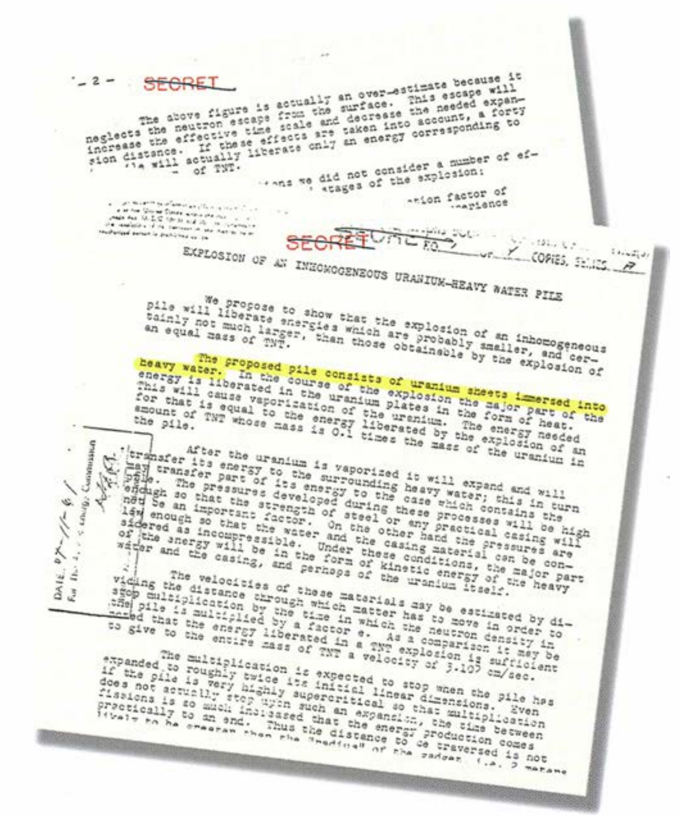
El carbono, por otra parte, es abundante y barato, aunque menos eficaz como moderador. A finales de 1940 Heisenberg había llegado a la conclusión de que debían emplearse, como moderadores, el carbono y el hidrógeno pesado. Pero en enero de 1941 Walther Bothe, el físico nuclear experimental más destacado que quedaba en Alemania, se puso a trabajar con el grafito. Sus experimentos parecían mostrar que el grafito absorbía los neutrones con demasiada intensidad para que pudiera ser un moderador eficiente. Bothe no se dio cuenta de que, a no ser que el grafito se purifique mucho más de lo que industrialmente se requiere, contiene impurezas de boro, elemento que chupa los neutrones como una esponja. Una parte de boro en 500.000 de grafito puede arruinar la función moderadora de éste. No obstante, el experimento de Bothe hizo que Heisenberg y otros físicos alemanes decidieran que el agua pesada era la única elección práctica.

Los físicos responsables del programa estadounidense para la construcción de un reactor, que sí tuvo éxito, realizaron el mismo tipo de cálculos. Como Heisenberg, concluyeron que un reactor de carbono necesitaría más uranio natural que el de agua pesada. Fermi y Leo Szilard habían hecho también experimentos sobre la absorción de neutrones por el carbono. Pero Szilard era un fanático de la pureza del grafito, y el suyo, al contrario que el de Bothe, fue un buen moderador. Como el carbono era tan barato en comparación con el agua pesada, decidieron que no había moderador mejor. El reactor de Fermi, que funcionó por vez primera el 2 de diciembre de 1942, tenía un retículo de porciones de uranio inmerso en el carbono. Todos los reactores experimentales alemanes —ninguno de los cuales funcionó jamás— utilizaban moderadores de agua pesada. Leamos otra vez la frase del memorándum de Bethe y Teller: "La pila propuesta está formada por láminas de uranio inmersas en agua pesada." Es como si alguien hubiese estampado "made in Germany" encima de este diseño.

Atando todos los cabos, parece que hay pocas dudas de que Heisenberg intentó describirle un dispositivo nuclear a Bohr, su versión del reactor. Puede que le diese a Bohr un dibujo o puede que no, pero está claro que éste guardó un recuerdo visual del diseño. Sin embargo, en esos momentos no comprendía la diferencia entre un reactor y una bomba, y dio por sentado que Heisenberg le había descrito una bomba.

Por tanto, puede que Aage Bohr tenga toda la razón cuando dice que, por lo que toca a su padre, no se habló nunca de un reactor. Puede también que tenga razón al decir que Heisenberg nunca le dio un dibujo a Bohr. Ninguna de las personas con las que he hablado está segura de que el dibujo que vieron hubiera sido trazado por el propio Heisenberg; sólo lo están de que era un dibujo del reactor que éste había concebido. Creo que así se resuelve el rompecabezas, pero no se desvela el misterio. Para empezar, ¿cuál era el propósito de la visita de Heisenberg? Quería, sostienen quienes admiran a Heisenberg, que Bohr supiese que los alemanes sólo trabajaban en un reactor "pacífico".

Hay que advertir también que Heisenberg sabía muy bien cuando visitó a Bohr que los reactores sólo podían usarse para producir plutonio y que el plutonio servía como combustible de una bomba nuclear. Entonces, ¿por qué visitó a Bohr? ¿Qué mensaje quería que le llegase? ¿Intentó convencer a Bohr de que participase o de que no participase? ¿Qué quería saber? Este es el verdadero misterio. Quizá no lo podremos desvelar nunca.



- 2 - SECRET

The above figure is actually an over-estimate because it neglects the neutron escape from the surface. This escape will increase the effective time scale and decrease the needed expansion distance. If these effects are taken into account, a forty ... will actually liberate only an energy corresponding to ... of TNT.

... we did not consider a number of ef- ... stages of the explosion:

... factor of ... experience

SECRET

EXPLOSION OF AN INHOMOGENEOUS URANIUM-HEAVY WATER PILE

We propose to show that the explosion of an inhomogeneous pile will liberate energies which are probably smaller, and certainly not much larger, than those obtainable by the explosion of an equal mass of TNT.

The proposed pile consists of uranium sheets immersed into heavy water. In the course of the explosion the major part of the energy is liberated in the uranium plates in the form of heat. This will cause vaporization of the uranium. The energy needed for that is equal to the energy liberated by the explosion of an amount of TNT whose mass is 0.1 times the mass of the uranium in the pile.

After the uranium is vaporized it will expand and will transfer its energy to the surrounding heavy water; this in turn may transfer part of its energy to the case which contains the pile. The pressures developed during these processes will be high enough so that the strength of steel or any practical casing will not be an important factor. On the other hand the pressures are low enough so that the water and the casing material can be considered as incompressible. Under these conditions, the major part of the energy will be in the form of kinetic energy of the heavy water and the casing, and perhaps of the uranium itself.

The velocities of these materials may be estimated by dividing the distance through which matter has to move in order to stop multiplication by the time in which the neutron density in the pile is multiplied by a factor e. As a comparison it may be noted that the energy liberated in a TNT explosion is sufficient to give to the entire mass of TNT a velocity of 3.10⁵ cm/sec.

The multiplication is expected to stop when the pile has expanded to roughly twice its initial linear dimensions. Even if the pile is very highly supercritical so that multiplication does not actually stop upon such an expansion, the time between fissions is so much increased that the energy production comes practically to an end. Thus the distance to be traversed is not likely to be greater than the "radius" of the gadget, i.e. 2 meters

5. **EL MEMORANDUM de Bethe y Edward Teller aborda la capacidad explosiva del reactor nuclear que Bohr les describió al llegar a Los Alamos. El documento no menciona a Heisenberg, pero el diseño que analiza coincide con el ideado por el alemán en 1939 y al que se mantuvo fiel durante toda la guerra.**

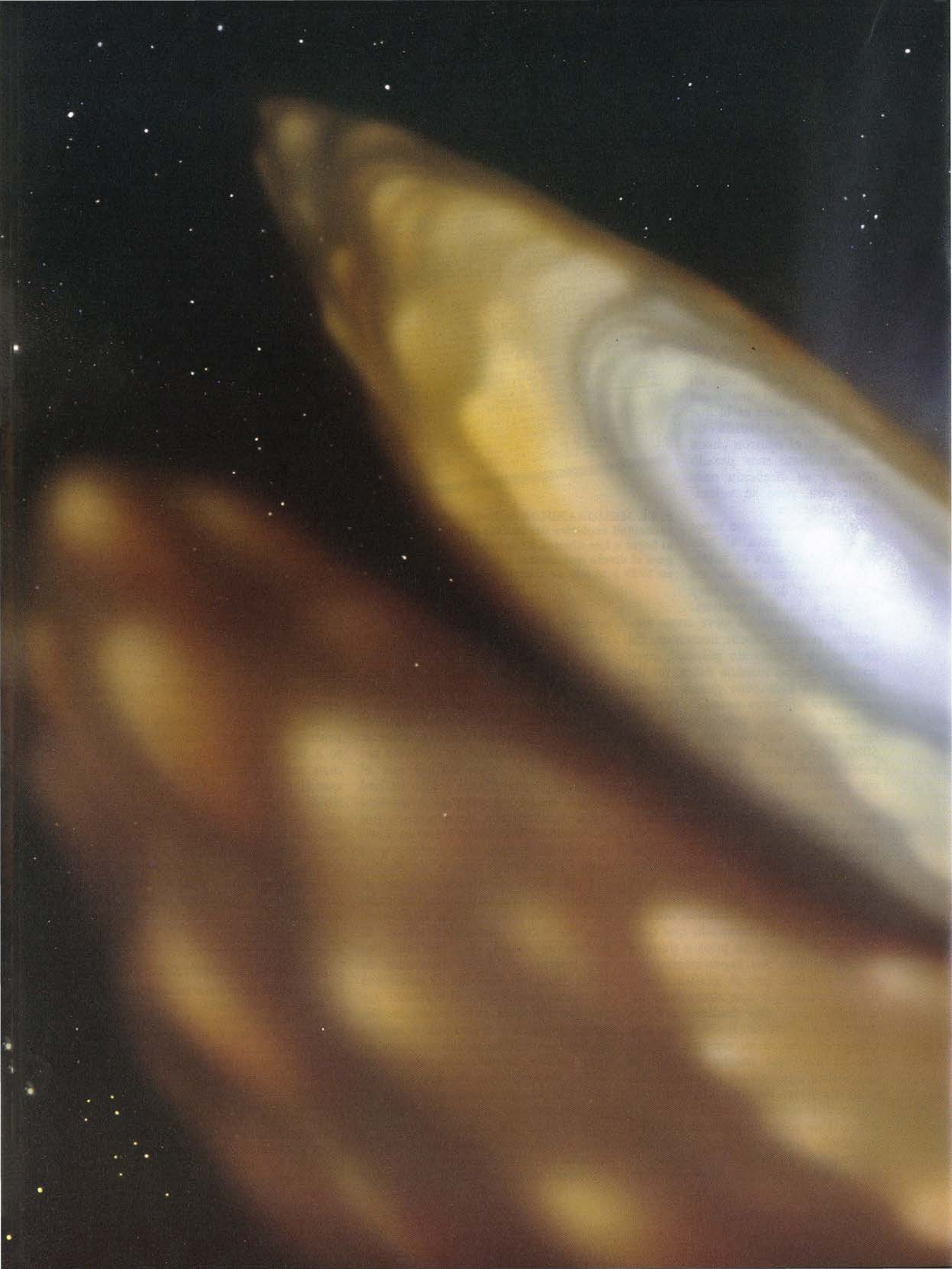
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HANS BETHE: PROPHET OF ENERGY. Jeremy Bernstein. Basic Books, 1980.

NIELS BOHR'S TIMES: IN PHYSICS, PHILOSOPHY AND POLITY. Abraham Pais. Oxford University Press, 1991.

THE LOS ALAMOS PRIMER: THE FIRST LECTURES ON HOW TO BUILD AN ATOMIC BOMB. Robert Serber. Dirigido por Richard Rhodes. University of California Press, 1992.

HEISENBERG'S WAR: THE SECRET HISTORY OF THE GERMAN BOMB. Thomas Powers. Alfred A. Knopf, 1993.



Estrellas binarias de neutrones

Estas parejas de residuos estelares aportan pruebas sólidas que confirman la relatividad general. Su inevitable colapso produce las que quizá sean las explosiones más violentas del universo

Tsvi Piran

COLISION DE ESTRELLAS de neutrones, final de un patrón de evolución estelar que ahora parece más convincente de lo que los astrónomos creyeran antes. Más de la mitad de las estrellas del cielo pertenecen a sistemas binarios; quizás una de cada cien de las parejas de mayor masa se convertirá en una estrella binaria de neutrones. Las ondas gravitatorias que emiten las estrellas al orbitar una alrededor de la otra transportan energía, hasta que caen en espiral y se funden. Fusión que genera radiación perceptible a una distancia de miles de millones de años luz.

En 1967 Jocelyn Bell y Antony Hewish encontraron el primer púlsar. Su radiotelescopio detectó las señales de una fuente que emitía pulsos muy regulares, cada 1,34 segundos. Eliminadas las fuentes terrestres y rechazada la posibilidad de que procedieran de seres extraterrestres, se quedaron desconcertados. Fue Thomas Gold quien adivinó que los púlsares eran estrellas de neutrones que, en su giro, emitían ondas de radio hacia el espacio, a la manera de un faro. Los radioastrónomos comenzarían muy pronto a sintonizar con otros púlsares.

Mientras Bell y Hewish realizaban su descubrimiento, una serie de satélites militares captaban unas señales aún más exóticas: pulsos vigorosos de rayos gamma procedentes del exterior. Esos estallidos disparaban los detectores que vigilaban la posible existencia de pruebas nucleares ilícitas. Habrían de transcurrir veinte años antes de que se conociera el origen de tales pulsos. Muchos opinan que los estallidos de rayos gamma son los estertores que emiten las estrellas de neutrones gemelas cuando se funden una con otra.

El descubrimiento de las estrellas binarias de neutrones se lo apuntaron Russell A. Hulse y Joseph H. Taylor Jr., quienes en 1974 pusieron en marcha un amplio estudio de los púlsares. Se valieron del radiotelescopio de Arecibo, y en pocos meses encontraron 40 púlsares nuevos. Había, entre ellos, una extraña fuente llamada PSR 1913+16 (las siglas PSR denotan que se trata de un púlsar, y los números su posición en el cielo: 19 horas y 13 minutos de longitud con una declinación de 16 grados). Emitía aproximadamente 17 impulsos por segundo, pero el período registraba una fluctuación que llegaba a ser de hasta 80 microsegundos de un día a otro. Los púlsares son tan regulares que esta pequeña variación resultaba llamativa.

Hulse y Taylor descubrieron que las variaciones de la frecuencia de las señales se acomodaban a un patrón regular que se repetía cada siete horas y 45 minutos. Este comportamiento no era novedoso, ya que durante años los astrónomos venían observando variaciones muy parecidas en la longitud de onda de la luz procedente de las estrellas binarias (estrellas que describen órbitas una alrededor de la otra). El efecto Doppler acorta la longitud de onda (y aumenta la frecuencia) de las señales emitidas cuando la fuente se mueve hacia la Tierra, y aumenta la longitud de onda (disminuye la frecuencia) cuando se aleja. Hulse y Taylor concluyeron que PSR 1913+16 orbitaba alrededor de una estrella compañera, pese a que los modelos de evolución estelar disponibles en ese momento predijeran únicamente la existencia de púlsares solitarios.

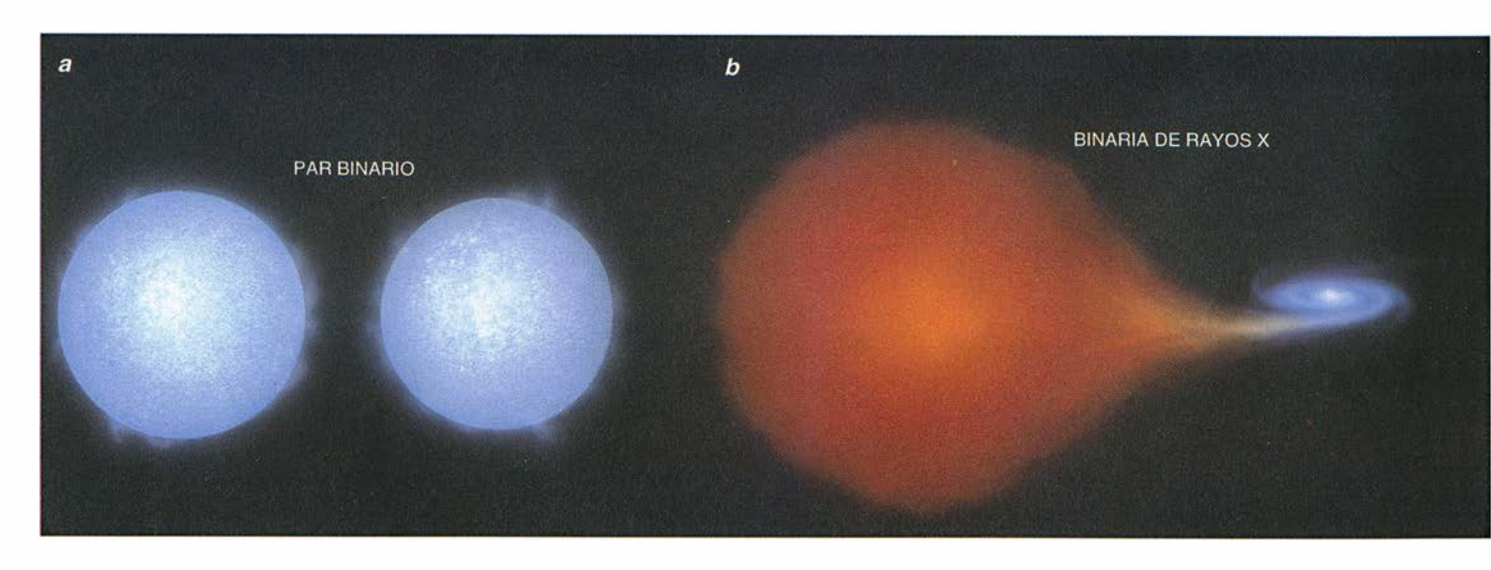
Las sorpresas no terminaron ahí. El análisis de los retrasos temporales indicaba que el púlsar y su compañera estaban separados por una distancia de 1,8 millones de kilómetros. A esa distancia, una estrella normal (con un radio de unos 600.000 kilómetros) hubiera impedido el paso de la señal del púlsar en algún punto de su órbita. La compañera no podía tampoco ser una enana blanca (con un radio aproximado de 3000 kilómetros), pues las interacciones de marea habrían perturbado la órbita de un modo que entraría en contradicción con las observaciones. Hulse y Taylor concluyeron que la compañera de PSR 1913+16 tenía que ser una estrella de neutrones.

Los astrónomos, que conocen ya la razón de la existencia de estrellas binarias de neutrones, se han servido de las señales producidas por ellas para realizar pruebas precisas de modelos astrofísicos y de relatividad general. La astrofísica anterior a 1974 negaba que hubiera estrellas binarias de neutrones. Los astrónomos estaban convencidos de que la sucesión de catástrofes estelares que se necesitan para crearlas habría destruido cualquier tipo de vínculo gravitatorio existente entre dos estrellas.

Las estrellas de neutrones son los restos de estrellas dotadas de gran masa que han desaparecido en una explosión de supernova tras consumir su combustible nuclear. La agonía empieza cuando una estrella de al menos seis masas solares agota el hidrógeno que contiene en su interior, se expande y se convierte en gigante roja. En esta fase, su núcleo alcanza una densidad extrema: varias masas solares en un radio de algunos miles de kilómetros. Un caparazón de más de 100 millones de kilómetros de ancho envuelve el resto de su materia mientras en el núcleo los elementos más pesados, el silicio, por ejemplo, sufren fusiones nucleares que los convierten en hierro.

Cuando el núcleo estelar alcanza una temperatura de miles de millones de grados kelvin, los núcleos de hierro se van descomponiendo, y absorben la energía térmica del entorno, lo cual reduce drásticamente la presión en dicha zona interior. Incapaz de resistir su propia atracción gravitatoria, el núcleo colapsa. Conforme su radio se acorta hasta medir sólo 15 kilómetros, los electrones y protones se convierten en neutrones; se crea así una estrella muy densa, con 1,4 veces la masa solar en un volumen de asteroide.

Mientras tanto, la energía liberada durante el colapso calienta la envoltura de la estrella, que durante algu-



nas semanas emite más luz que la galaxia entera. Las observaciones de supernovas viejas, como la de la Nebulosa del Cangrejo, cuya luz llegó a la Tierra en el año 1054, revelan la existencia de una estrella de neutrones rodeada de una nube de gas que sigue expandiéndose por el espacio interestelar.

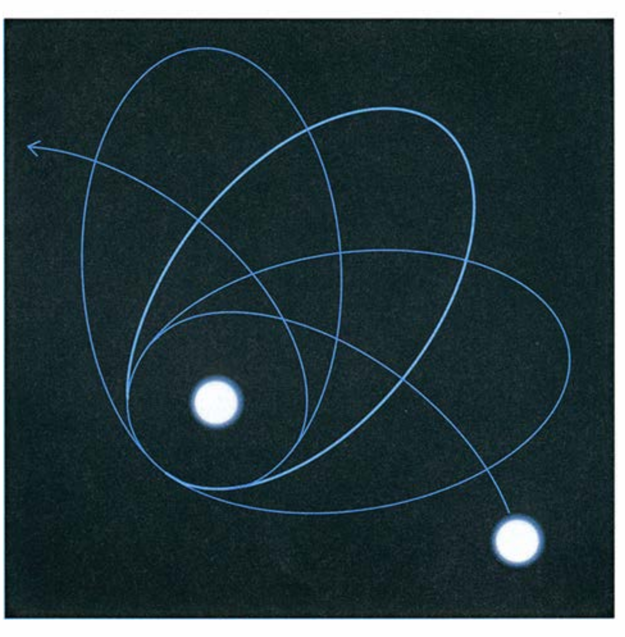
Más de la mitad de las estrellas pertenecen a sistemas binarios; no resulta sorprendente que algunas parejas de estrellas de gran masa permanezcan unidas aun después de que una de ellas sufra una explosión de supernova. La pareja se convierte entonces en binaria de rayos X de gran masa, denominada así debido a la emisión que produce la estrella de neutrones cuando le arrebata la atmósfera exterior a su compañera. La segunda estrella acabará por explotar en supernova, para convertirse en estrella de neutrones. La envoltura expulsada por la segunda supernova contiene la mayor parte de la masa de la binaria (ya que la estrella de neutrones tiene sólo 1,4 masas solares). Esta expulsión, que supone una fracción muy elevada de la masa total, debería, pues, desbaratar al sistema binario y lanzar las dos estrellas de neutrones (la vieja y la que se acaba de formar) por el espacio a velocidades de cientos de kilómetros por segundo.

Sin embargo, el descubrimiento de Hulse y Taylor demostró que algunas binarias consiguen superar la segunda explosión de supernova. A toro pasado, los astrónomos se dieron cuenta de que la segunda explosión de supernova podía ser asimétrica e impulsar la estrella de neutrones recién formada, no al vacío, sino hacia una órbita estable. La segunda supernova, además, podría ser menos destructiva si la segunda estrella perdiese su envoltura de forma gradual durante la fase de estrella binaria de rayos X de gran masa. Desde entonces, el descubrimiento de tres estrellas binarias de neutrones más da fe de que otras parejas de estrellas de masa grande han logrado sobrevivir a la segunda supernova.

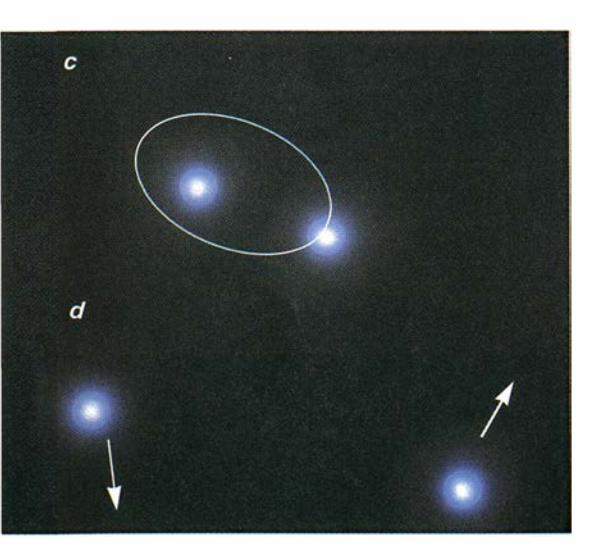
Hace ya varios años, Ramesh Narayan, Amotz Shemi, E. Sterl Phinney y el autor calcularon que alrededor del uno por ciento de las binarias de rayos X sobreviven y forman estrellas binarias de neutrones de gran masa. Esta cifra implica que nuestra galaxia alberga unas 30.000 estrellas binarias de neutrones. Adoptando un argumento similar, se llegó a la conclusión de que debería existir un número comparable de binarias, aún por descubrir, que constaran de una estrella de neutrones y un agujero negro. Una pareja así se formaría en el momento en que una de las estrellas que conforman una pareja de gran masa dejase un resto —después de explotar en supernova— cuya masa doblara la solar; su colapso la convertiría en una singularidad espacio-temporal, no en una estrella de neutrones. Las binarias de agujeros negros, más inusuales anque viables en principio, comienzan su vida formando una pareja de estrellas de una masa enorme; se calcula que hay más de 300 en la galaxia.

Las consecuencias que se derivaron del descubrimiento de PSR 1913+16 trascendieron la revisión de las teorías sobre la evolución de las estrellas binarias. Hulse y Taylor se percataron de que su descubrimiento proporcionaba el contexto ideal para someter a prueba la teoría general de la relatividad de Einstein.

Pese a ser la única teoría que ofrece una descripción aceptable de la gravedad, ha sido objeto de pocas pruebas directas. El propio Einstein estimó la precesión de la órbita de Mercurio (el desplazamiento de los ejes orbitales de Mercurio y su punto de mayor aproximación al Sol) y demostró que las observaciones concordaban con su teoría. Arthur Eddington detectó la curvatura de los rayos de luz durante un eclipse solar en 1919. En 1960, Robert V. Pound y Glen A. Rebka, Jr., midieron el corrimiento al rojo por efecto de la gravedad, la pérdida de energía que experimentan los fotones a medida que escapan de un campo gravitatorio intenso. Por último, en 1964, Irwin I. Shapiro apuntó que los rayos de luz curvados por un campo gravitatorio deberían sufrir un retraso respecto a los que siguen una trayectoria recta. Lo midió mediante las señales de radar que hacía rebotar en otros planetas del sistema solar. La relatividad general superó estas pruebas, pero todas se llevaron a cabo en el débil (en términos relativistas) campo gravitatorio del sistema solar. Esto dejaba abierta la posibilidad de que la relatividad general se derrumbase en campos gravitatorios más intensos.



1. LLAMASE precesión orbital la rotación del eje principal de una órbita elíptica. Las perturbaciones relativistas del movimiento de los cuerpos que se desplazan a gran velocidad en un campo gravitatorio intenso hacen que se produzca una precesión orbital. La precesión de la órbita de Mercurio es de menos de un 0,12 de grado cada siglo, pero la de PSR 1913+16 cambia en 4,2 grados cada año.



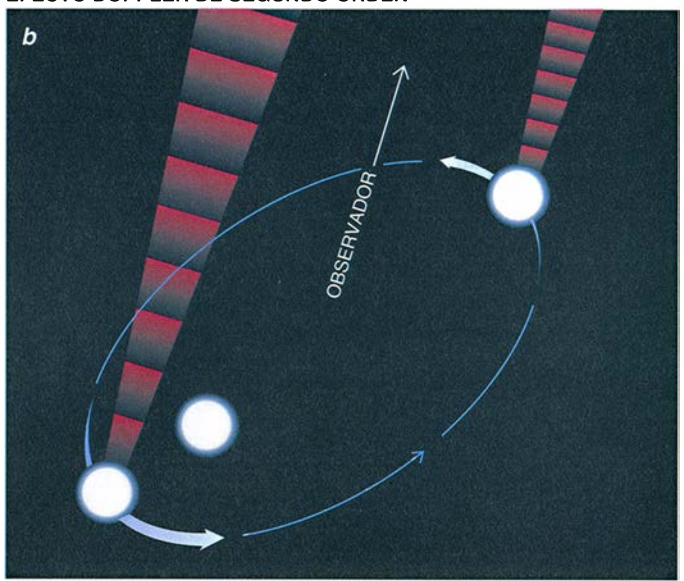
2. LOS SISTEMAS BINARIOS DE GRAN MASA (*a*) pasan por una secuencia de sucesos violentos. La estrella más pesada del par consume antes su combustible y sufre una explosión de supernova; si las dos estrellas se mantienen unidas, el resultado será una binaria de rayos X de masa grande (*b*) en la que el resto de la primera estrella, en forma de estrella de neutrones, consume el gas de su compañera y emite radiación X. La segunda estrella también agota su combustible. En uno de cada cien casos, la explosión deja un par de estrellas de neutrones que orbitan una alrededor de la otra (*c*); en los otros 99, las estrellas se van separando (*d*).

EFECTO DOPPLER DE PRIMER ORDEN

a

OBSERVADOR

EFECTO DOPPLER DE SEGUNDO ORDEN



3. LAS SEÑALES DE UN PULSAR BINARIO se ven afectadas por fenómenos relativistas. (Cada ilustración muestra uno de los efectos cuya combinación produce el ritmo de los pulsos que observan los astrónomos.) Cuando, en su órbita, el púlsar se aleja de la Tierra, el efecto Doppler acorta el tiempo que tardan los pulsos en llegar al observador, y lo aumenta cuando el objeto se acerca (*a*). El efecto Doppler de segundo orden y el corrimiento al rojo gravitatorio (*b*) producen una variación

Porque el púlsar viene a ser un reloj que describe órbitas en el intenso campo gravitatorio de su compañera, la relatividad realiza predicciones muy claras acerca de cómo oiríamos el tictac de ese reloj (los pulsos) desde la Tierra. En primer lugar, el efecto Doppler produce una variación periódica en el tiempo de llegada de los pulsos (el patrón que alertó a Taylor y Hulse).

Un efecto Doppler de "segundo orden", debido a la dilatación temporal causada por el veloz movimiento del púlsar, produce una variación adicional, mucho menor. Se puede apreciar este efecto de segundo orden porque depende del cuadrado de la velocidad, que varía a medida que el púlsar se desplaza en su órbita elíptica. El desplazamiento Doppler de segundo orden se combina con el corrimiento al rojo gravitatorio, la ralentización del reloj del púlsar cuando éste atraviesa el campo gravitatorio más fuerte que existe en las cercanías de su compañera.

Al igual que Mercurio, PSR 1913+16 sufre precesión en la órbita alrededor de su compañera. Pero los intensos campos gravitatorios que entran en juego indican que el periastro —el nadir de la órbita— se desplaza alrededor de 4,2 grados cada año, mientras que el desplazamiento del perihelio de Mercurio es de sólo 42 segundos de arco cada siglo. Los efectos medidos encajan con las predicciones de la teoría relativista. Es notable que la información relativa a la precesión y a las órbitas, proporcionada por los pulsos de radio, haga posible el cálculo de las masas del púlsar y de su compañera: 1,442 y 1,386 mases solares respectivamente, con una incertidumbre de 0,003 masas solares. Esta precisión es impresionante teniendo en cuenta que se refiere a dos objetos situados a 15.000 años luz.

En 1991, Alexander Wolszczan encontró otro púlsar binario que viene a ser casi el gemelo de PSR 1913+16. Cada estrella de neutrones pesa entre 1,27 y 1,41 masas solares. El retraso temporal de Shapiro, que sólo se midió en el PSR 1913+16 como un efecto marginal, se distingue con nitidez en las señales procedentes del púlsar que descubrió Wolszczan.

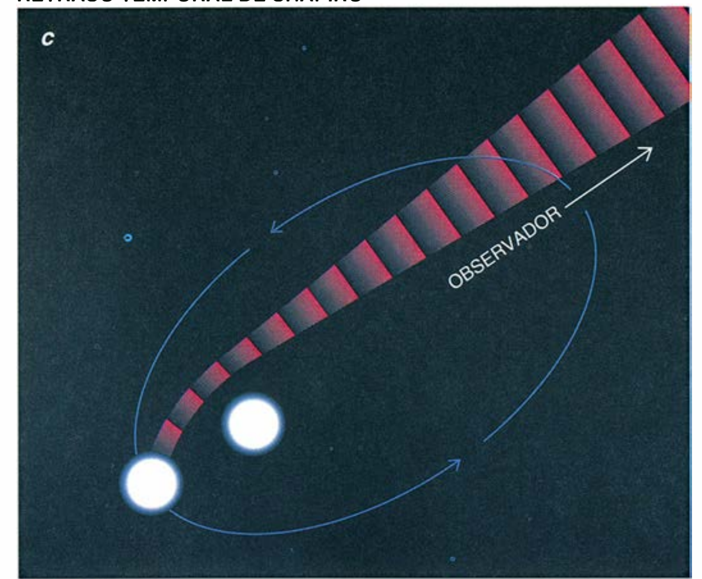
Las mediciones de PSR 1913+16 han revelado un efecto relativista jamás visto hasta ahora. En 1918, Einstein predijo la existencia de la radiación gravitatoria, análoga a la radiación electromagnética. Cuando las partículas dotadas de carga eléctrica se aceleran, emiten ondas electromagnéticas. De forma similar, las partículas con masa que se desplazan con una aceleración variable emiten ondas gravitatorias, pequeñas arrugas en el campo gravitatorio que también se propagan a la velocidad de la luz.

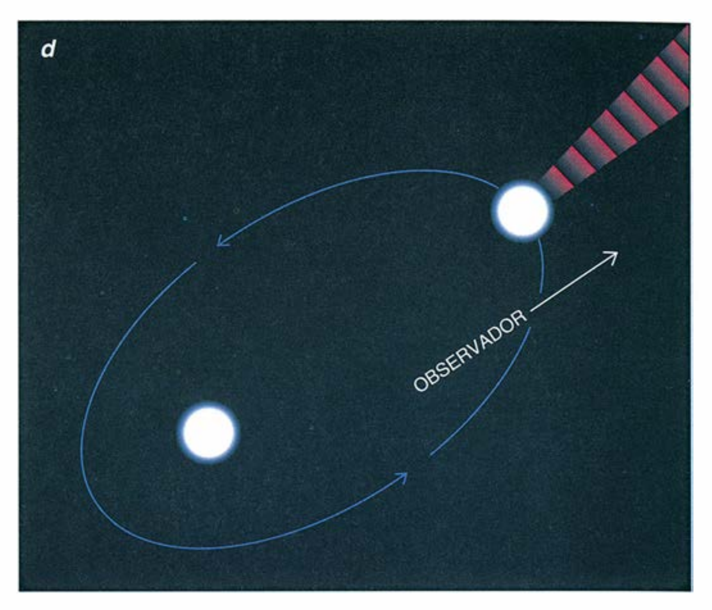
Estas ondas establecen interacciones con otras masas; si dos objetos se pueden mover libremente, la distancia entre ellos variará según la frecuencia de la onda. El tamaño de la oscilación depende de la separación entre los dos objetos y de la amplitud de las ondas. En principio, todos los objetos cuya aceleración cambia emiten radiación gravitatoria. Sin embargo, la mayoría de los objetos son demasiado pequeños y proceden con tal lentitud que la radiación gravitatoria es insignificante.

Los púlsares binarios constituyen una excepción a esta regla. La emisión de ondas gravitatorias produce un efecto detectable en el sistema binario. En 1941, mucho antes del descubrimiento de los púlsares binarios, Lev D. Landau y Evgenii M. Lifshitz calcularon el efecto de esta emisión sobre el movimiento de las estrellas en un sistema binario. El principio de la conservación de la energía exige que la energía transportada por las ondas venga de alguna parte, en este caso de la energía orbital de las dos estrellas. Como resultado, la distancia entre ellas tiene que disminuir.

PSR 1913+16 emite radiación gravitatoria a una velocidad de ocho trillones de gigawatts, una energía equivalente a un quinto de la radiación total del Sol. Esta luminosidad es impresionante por lo que se refiere a las fuentes de radiación gravitatoria, pero sigue siendo demasiado débil para permitir una detección directa desde la Tierra. No obstante, produce un efecto notable sobre la órbita del púlsar. La distancia entre las dos estrellas de neutrones disminuye unos metros cada año, lo suficiente para producir una variación detectable en el ritmo de los pulsos de radio. Gra-

RETRASO TEMPORAL DE SHAPIRO





similar debido a que el reloj interno del púlsar se ralentiza cuando orbita más velozmente y más cerca de su compañera (*flecha más alargada*). Más sutil es el retraso temporal de Shapiro, que tiene lugar a medida que el campo gravitatorio de la compañera curva las señales que pasan a su lado (*c*). Las señales recorren así una distancia mayor que si escogieran una trayectoria recta (*d*) y, por tanto, llegan más tarde. Este efecto no se puede detectar en PSR 1913+16.

cias a un seguimiento de los pulsos procedentes de PSR 1913+16 a lo largo de los años, el grupo de Taylor ha demostrado que la separación orbital disminuye en cabal acuerdo con las predicciones de la teoría general de la relatividad.

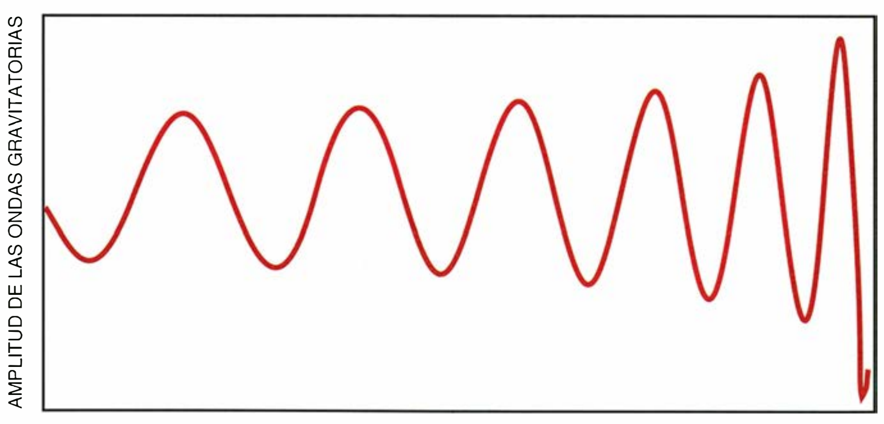
La comparación de la reducción de la distancia que media entre las estrellas con otros efectos de la relatividad general proporciona una ulterior confirmación. Igual que las medidas de la caída orbital, así también el desplazamiento del periastro y el efecto Doppler de segundo orden producen una función matemática que relaciona la masa del púlsar y su compañera. La intersección de las tres funciones se da en el mismo punto.

Actualmente, la distancia que separa a PSR 1913+16 de su compañera disminuye muy despacio. A medida que la distancia se vaya acortando, la emisión de ondas gravitatorias aumentará y se acelerará la caída de las órbitas. Las estrellas de neutrones terminarán por precipitarse una sobre la otra a una fracción considerable de la velocidad de la luz, chocarán y se fundirán en una sola. Los 300 millones de años que habrán de transcurrir hasta que PSR 1913+16 se una a su compañera parecen interminables a escala humana, pero es un período bastante corto a escala astronómica.

Dado el número de binarias de estrellas de neutrones existentes en la galaxia, debería haber una fusión cada 300.000 años más o menos, un abrir y cerrar de ojos en términos cosmológicos. Al extrapolar esta frecuencia a otras galaxias, resulta que por todo el universo observable tiene lugar una fusión de estrellas de neutrones al menos cada veinte minutos, frecuencia suficiente para que los astrónomos consideren la posibilidad de detectar estas colisiones.

Para descubrir si estos fenómenos son detectables, se requiere un conocimiento sólido de qué ocurre exactamente cuando colisionan dos estrellas de neutrones que han estado girando una alrededor de la otra. Poco después del descubrimiento del primer púlsar binario, Paul Clark y Douglas M. Eardley concluyeron que el producto final sería un agujero negro. Según los cálculos actuales, la masa máxima de una estrella de neutrones oscila entre 1,4 y 2,0 masas solares. La rotación aumenta la masa máxima, pero la mayoría de los modelos sugiere que ni siquiera una estrella de neutrones de rotación rápida puede ser mucho mayor que 2,4 masas solares. Dado que las dos estrellas contienen en su conjunto unas 2,8 masas solares, es inevitable un colapso que las convierta en una singularidad espacio-temporal.

Melvyn B. Davies, Willy Benz, Friedrich K. Thielemann y el autor han simulado los últimos instantes de una binaria de estrellas de neutrones. Los dos objetos, muy densos,



4. LAS ONDAS DE GRAVEDAD procedentes de las estrellas de neutrones que se han fusionado poseen un rasgo característico. A medida que las dos se van acercando durante los últimos minutos de sus vidas emiten radiación gravitatoria cuya frecuencia está relacionada con su período orbital. La amplitud de la señal aumenta, y en su "gorjeo" ésta pasa de algunos ciclos por segundo a varios cientos de ciclos.

se comportan como masas puntuales hasta que están muy cerca el uno del otro. La interacción de marea entre las estrellas sólo comienza a adquirir significación cuando están a 30 kilómetros de distancia, el doble del radio de una estrella de neutrones. En ese instante, cada una empieza a desgajar materia de la otra; al menos, dos décimas de la masa solar en total. Tras rozarse, no tardan ni una fracción mínima de segundo en fundirse. La materia desgajada antes de la colisión forma un disco que circunda el núcleo central y que acaba por caer en él.

¿Qué tipo de señales genera esta secuencia de eventos? Clark y Eardley comprendieron que las estrellas colisionantes se calientan hasta temperaturas de varios miles de millones de grados kelvin. Calcularon que la mayor parte de la energía térmica produciría radiación en forma de neutrinos y antineutrinos, igual que en una supernova. Pero estas partículas sin masa, cuya interacción es débil y que escapan de las densas estrellas de neutrones con mucha más facilidad que los fotones, son casi imposibles de detectar. Cuando estalló la supernova 1987A, los tres detectores instalados en tierra atraparon un total de 21 neutrinos en la radiación detectada (5×10^{46} joules). Aunque el estallido que se espera de la fusión de una estrella binaria de neutrones es algo mayor que el de una supernova, el fenómeno tiene lugar a una distancia muy superior a los 150.000 años luz de SN 1987A. Para detectar una fusión por año habría que recoger señales cuya intensidad sólo fuese dieciséis millonésimas de la que tuvo el fenómeno de 1987. Las interacciones que pueden captar los actuales detectores de neutrinos se producen en el interior de miles de toneladas de material; es difícil, pues, imaginar el tipo de aparato que se necesitaría. Además, las supernovas son mil veces más frecuentes que las colisiones entre estrellas de neutrones. Aunque detectáramos un estallido de neutrinos procedente de dos estrellas de neutrones, es poco probable que lo distinguiéramos de los estallidos de neutrinos de las supernovas, mucho más numerosos e intensos.

Antes de emitir su explosión de neutrinos, la estrella binaria de neutrones envía ondas gravitatorias de energía similar y mucho más fáciles de detectar. Durante los 15 minutos que anteceden a la fusión, las dos estrellas cubren los últimos 700 kilómetros que las separan y su período orbital disminuye de un quinto de segundo a unos cuantos milisegundos. La señal resultante se encuentra en el intervalo óptimo para los detectores de ondas de gravedad.

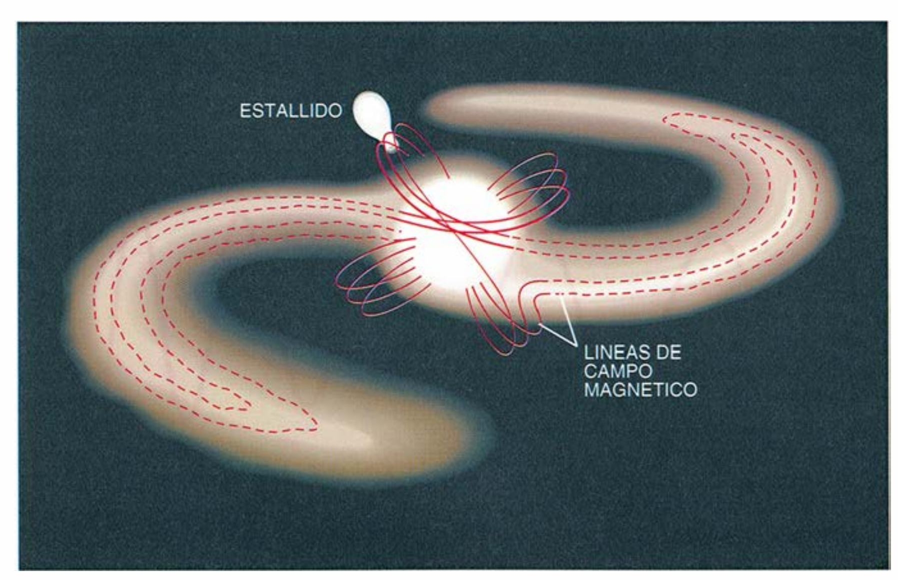
En los Estados Unidos y en Italia se está construyendo una red internacional de detectores que reúne esas características. El equipo estadounidense está preparando detectores para el Observatorio de Ondas Gravitatorias con Interferómetro Láser (LIGO). El equipo italo-francés construye la instalación VIRGO. Los primeros detectores estarán capacitados para captar fusiones de estrellas de neutrones que ocurran a una distancia de 70 millones de años luz. Los cálculos actuales sugieren que hasta esa distancia sólo se produce un suceso cada 100 años. Los investigadores se han propuesto conseguir mejoras notables en sus instrumentos a lo largo de los próximos años, a fin de poder detectar fusiones de estrellas de neutrones que se produzcan incluso a tres mil millones de años luz (varios cientos al año).

Varios años después del descubrimiento de PSR 1913+16 dudaba todavía si habría un modo de estimar qué fracción de la energía que une a las estrellas que se funden se emite en forma de radiación electromagnética. Aun cuando esa fracción fuera ínfima, la energía que las une es tan enorme, que la radiación resultante seguiría siendo colosal. Además, los fotones son mucho más fáciles de detectar que los neutrinos o las ondas gravitatorias, por lo que se podrían detectar fusiones procedentes incluso de los confines más remotos del universo.

En 1987, J. Jeremy Goodman, Arnon Dar y Shmuel Nussinov se percataron de que alrededor de una décima por ciento de los neutrinos y antineutrinos emitidos por el núcleo de una supernova que colapsa chocan, se aniquilan y producen parejas de electrones y positrones junto con rayos gamma. En una supernova, la absorción de estos rayos gamma por el caparazón de la estrella desempeña un importante papel en la explosión de las capas externas.

En 1989 trabajé con David Eichler, Mario Livio y David N. Schramm, e hicimos cábalas sobre la posibilidad de que una fracción similar de los neutrinos expulsados durante la fusión de una estrella binaria de neutrones produjera también parejas de electrones y positrones y rayos gamma. Pero las estrellas de neutrones en proceso de colisión no cuentan con un caparazón que las envuelva; los rayos gamma se escapan en forma de pulsos cortos e intensos.

Es posible que los pulsos de rayos gamma se generen por un mecanismo mucho más complejo. El disco creado durante el proceso de fusión de las estrellas de neutrones cae sobre el objeto central único que se forma en pocos segundos, pero en ese tiempo también él puede desencadenar emisiones. En 1992, Bohdan Paczyński, Narayan y yo sugerimos que la rotación del disco podría intensificar los campos magnéticos de la estrella de neutrones que se enmarañan en la materia del disco, cau-



5. LOS ESTALLIDOS DE RAYOS GAMMA podrían también producirse por un mecanismo similar al causante de las fulguraciones solares. El campo magnético de las estrellas de neutrones fusionadas se amplifica conforme se va enrollando por el disco de material expulsado durante la fusión. El campo acelera las partículas dotadas de carga hasta que emiten rayos gamma.

sando gigantescas fulguraciones magnéticas, una versión a gran escala de las fulguraciones solares. Estas perturbaciones magnéticas de corta vida podrían generar estallidos de rayos gamma, del mismo modo que las fulguraciones solares producen rayos X y gamma. La variabilidad de los estallidos da a entender que quizá ambos mecanismos entren en juego.

Si no fuera por el Tratado de Limitación de Pruebas Nucleares de 1963 no hubiéramos tenido conocimiento de estos estallidos hasta bien entrado el próximo siglo. A nadie se le hubiera ocurrido proponer que un satélite se dedicara a su búsqueda. Los *Vela* llevaban a bordo detectores omnidireccionales de rayos X y gamma para verificar que no se realizaban pruebas con cabezas nucleares en el espacio.



6. LOS INTERFEROMETROS LIGO podrán detectar la radiación gravitatoria procedente de la colisión de estrellas de neutrones distantes miles de millones de años luz. Si estas señales se detectan al mismo tiempo que los estallidos de rayos gamma, se habrá resuelto un viejo misterio.

Los satélites no observaron nunca una explosión nuclear, pero en cuanto se lanzó el primero de ellos empezaron a detectarse estallidos, inesperados, de protones de una gran energía, del orden de varios cientos de kiloelectronvolts. Las explosiones duraban de decenas de milisegundos a unos 30 segundos. El retraso en el tiempo de llegada de las explosiones a los diferentes satélites indicaba que las fuentes estaban situadas fuera del sistema solar. Aun así, la existencia de los estallidos se mantuvo en secreto durante varios años, hasta 1973, cuando Ray W. Klebesadel, Ian B. Strong y Roy A. Olson los describieron. Los teóricos propusieron luego más de cien modelos. A finales de los años ochenta llegó a haber consenso en que los estallidos se originaban en estrellas de neutrones de nuestra propia galaxia.

Una minoría encabezada por Paczyński argumentó que las explosiones se originaban a distancias cosmológicas. En la primavera de 1991 la NASA lanzó el *Observatorio Compton de Rayos Gamma*, de una sensibilidad superior a la de cualquier satélite de rayos gamma precedente, y descubrió dos datos inesperados. El primero, que la distribución de la intensidad de los estallidos no es homogénea, como habría de ser si las explosiones ocurrieran cerca de nosotros. El segundo, que las explosiones proceden de todo el firmamento; no están, pues, concentradas en el plano de la Vía Láctea, como sucedería si se originasen en el disco galáctico. Juntos, estos dos hechos demuestran que las explosiones no se originan ni en el disco ni en nuestra galaxia. Sigue abierto el debate sobre la posibilidad de que los estallidos broten en rincones remotos del halo invisible de nuestra galaxia, pero a medida que el *Observatorio Compton* recoge más datos, esta hipótesis parece cada vez menos plausible. Todo apunta a que la minoría estaba en lo cierto.

En el otoño de 1991 analicé la distribución de las intensidades de los estallidos, y también lo hicieron Paczyński y su colega Shude Mao. Concluimos que las explosiones más lejanas que observó el *Observatorio Compton* ocurrieron a varios miles de millones de años luz. Las señales procedentes de tales distancias sufren un corrimiento hacia el rojo (su longitud de onda está aumentada y la energía disminuida) debido a la expansión del universo. En consecuencia, predijimos que el corrimiento al rojo cosmológico debería conducir a una correlación entre la intensidad de los estallidos, su duración y sus espectros. Los estallidos más débiles, que suelen provenir de más lejos, tendrían una duración mayor y contendrían una distribución de rayos gamma de menor energía.

El equipo encabezado por Jay P. Norris encontró esa correlación. El número de estallidos que registra el *Observatorio Compton* también concuerda con nuestros cálculos anteriores sobre la población de estrellas binarias de neutrones. Cada año deberían producirse unas 30.000 fusiones por todo el universo observable; los detectores de los satélites pueden barrer una esfera que contiene más o menos un 3 % de ese volumen. En un volumen así tendrían que suceder 900 fusiones por año; el *Observatorio Compton* ha registrado 1000 explosiones.

Aunque todavía se están afinando los detalles acerca de cómo la colisión de estrellas de neutrones genera los rayos gamma, la convergencia de los datos, procedentes de fuentes diferentes, indica que sin ser conscientes de ello los astrónomos han estado detectando fusiones de estrellas de neutrones durante los últimos 25 años. Los investigadores han propuesto algunas otras fuentes que podrían emitir la enorme energía que requieren las explosiones de rayos gamma cosmológicos. El modelo de la fusión, sin embargo, es el único que se basa en un fenómeno observado independientemente, el movimiento de caída en espiral de una estrella binaria de neutrones como resultado de la emisión de ondas de gravedad.

TSVI PIRAN enseña relatividad general y astrofísica en la Universidad Hebrea de Jerusalén.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LIGO: THE LASER INTERFEROMETER GRAVITATIONAL-WAVE OBSERVATORY. Alex Abramovici et al., en *Science*, vol. 256, páginas 325-333; 17 de abril de 1992.

PROBING THE GAMMA-RAY SKY. Kevin Hurley en *Sky and Telescope*, vol. 84, n.º 6, págs. 631-636; diciembre de 1992.

BINARIAS DE RAYOS X. Edward P. J. van den Heuvel y Jan van Paradijs en *Investigación y Ciencia*, enero de 1994, págs. 38-46.

Alina Quevedo

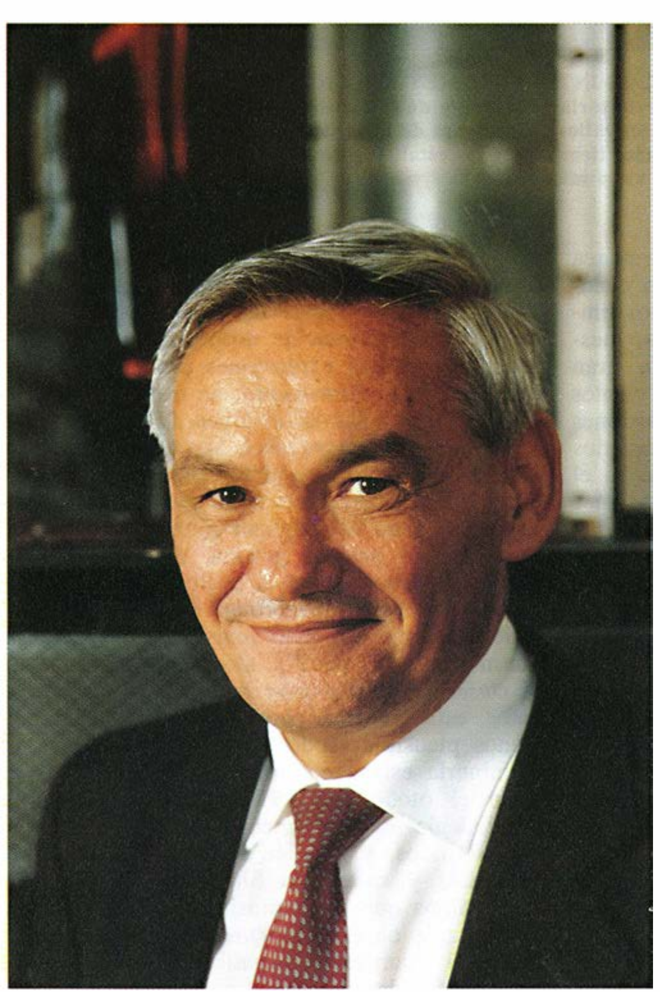
AMABLE LIÑÁN: *el secreto matemático de la llama*

El nombre, Amable Liñán, como de personaje de García Márquez, cifra el talante de este ingeniero aeronáutico, teórico de mecánica de fluidos, que nació hace 59 años en Noceda, sitio casi desaparecido, en algún lugar de la Cabrera leonesa.

Amable Liñán tiene los ojos oscuros, ligeramente oblicuos y clava en su interlocutor una mirada astuta, que, cuando perplejo o divertido alza las cejas, dos ángulos sombríos, le dan un falso aspecto mefistofélico. En los noventa dirige el departamento de motopropulsión y termofluidodinámica en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos, donde cursó esta carrera entre 1955 y 1960. Dice que la escogió "casi accidentalmente, deslumbrado por los aviones", y la fama de difíciles de los cursos de ingeniería. A poco que se le interrogue sobre su formación, evoca a "Don Amando", el maestro de un pueblo astorgano que influyó para que, con doce años, lo mandaran a estudiar a Madrid. "Eran tiempos muy duros", comenta.

"Yo llegué con optimismo a la Escuela de Ingenieros Aeronáuticos (en 1955) y posteriormente al INTA, donde me encontré con profesores para mí excepcionales, entre otras cosas, por la fe y el cariño con que acogían a los jóvenes ilusionados." La Escuela de Aeronáuticos, heredera de la Escuela Superior Aerotécnica, fundada por Emilio Herrera y Linares, prolonga la tradición de los ingenieros militares, el cuerpo más ilustrado, quizá con artilleros y marinos, de la España de los tres últimos siglos. Tuvo la Aerotécnica parte destacada, aunque tardía, en lo que se ha llamado la edad de plata de la cultura nacional, con la escuela cajaliana en biomedicina, la menendezpidalista en historia, la generación del ventisiete en literatura, el orteguismo, Cabrera en física, Rocasolano en química y mil más. La Aerotécnica aportó Terradas, Plans, Rey Pastor, Navarro Borrás, Puig Adam, San Juan y Palacios.

Tras la guerra civil, en 1942, se crea en Madrid el Instituto Nacional de Técnica Aerospacial (INTA). En el grupo de combustión que ha formado allí Gregorio Millán, maestro y amigo de Liñán, se integra éste como becario de investigación cuando cursa todavía cuarto de carrera. Inspirador del núcleo fue Theodore von Karman, fundador de la aeronáutica estadounidense, con quien Millán colaboraba.



AMABLE LIÑAN ha llevado el rigor matemático a la dinámica de fluidos

Habla despacio. Repite, y se hace entender. Catedrático desde 1965, disfruta enseñando. Una vocación que según cuenta un profesor del centro, ocasionó que fuera, en una ocasión, obligado a salir del aula, aún tiza en ristre, conminado por un colega y amigo harto de que este catedrático de mecánica de fluidos ocupara el tiempo de su clase. Hasta el momento no se conoce que le ocurriera algo semejante en sus lecciones en las universidades de Princeton, Michigan, California o Marsella, donde ha impartido cursos.

A Amable Liñán le gusta la literatura, especialmente Borges, y aunque quejándose sin motivo de su deficiente memoria, "quisiera ser como Funes el memorioso", dice, rescata un verso para esclarecer su objeto de estudio: "El fulgor del fuego que ningún ser humano puede mirar sin asombro antiguo."

La causa científica del brillo del fuego es una reacción química exotérmica entre un combustible y un oxidante, con frecuencia el aire, llamada combustión. "Es una reacción típica entre el oxígeno del aire y los combustibles, y éstos han de ser mezclados íntimamente antes de que la reacción se produzca. En la mezcla de los reactantes intervienen mecanismos físicos como el transporte convectivo, la difusión y la conducción del calor", deslíe con pedagógica claridad.

Liñán ha contribuido a parcelar los componentes de este proceso, algo que según admite es como tratar de

hallar el orden del caos con un tratamiento matemático propio de fenómenos no lineales, en los que no es posible superponer las causas y los efectos. Al describir la estructura de las capas delgadas de la reacción con técnicas asintóticas, desveló un balance entre la difusión y la conducción normal a la capa de reacción, con los efectos de la reacción química, válido para los casos más generales, conocido como problema o ecuación de Liñán.

Existe una línea de continuidad entre la solución aportada por Amable Liñán y las precedentes de la escuela rusa de Lev D. Landau, Yakov B. Zeldovich, A. G. Istutov y V. B. Librovich, que se hace manifiesta en uno de los principales artículos publicados por el primero, sobre "La estructura asintótica de las llamas de difusión de contraflujo para grandes energías de activación", estructura de la que obtiene, mediante análisis de la mezcla y la reacción química de dos chorros opuestos de combustible y oxidante, expresiones analíticas para las condiciones de ignición y extinción.

Amable Liñán y el norteamericano Forman Williams sumaron sus hallazgos en este campo y el resultado ha sido un tratado publicado por la editora de la Universidad de Oxford, en 1993. "Una parte importante del trabajo es tratar de entender los mecanismos físicos determinantes de cada uno de los fenómenos que participan. Esto es posible porque existen tiempos característicos asociados a cada uno de ellos. Son tiempos muy diferentes: el tiempo de difusión es muy grande en comparación con el de transporte. La difusión está limitada a zonas muy restringidas. Es precisamente esta disparidad de las escalas de los fenómenos lo que simplifica su descripción, porque permite tratarlos con análisis asintótico. Mi aporte a la teoría de la combustión consistió en incorporar las técnicas de análisis asintótico que ya se habían sistematizado para tratar problemas no lineales de mecánica de fluidos", explica Liñán, que estudia los problemas de ignición y propagación de llamas en condiciones de microgravedad, dentro de los proyectos de la Agencia Europea del Espacio (ESA).

La profundización en el conocimiento de los fenómenos básicos de la combustión coincidió con el auge de la aeronáutica aplicada con fines estratégicos durante los largos años de la guerra fría y la carrera espacial: un campo abordado tanto por Estados Unidos como por la antigua Unión Soviética.

Pero ya en 1947 el investigador Theodore von Karman vio la posibilidad de desarrollar una formulación básica de los fenómenos de combustión, para hacer más eficientes los motores de los aviones de combate americanos. Amable Liñán, distinguido con el premio Príncipe de Asturias en 1993, comenta treinta años después la emoción que le produjo conocer a este personaje, "siendo sólo un estudiante". Fue presentado por Gregorio Millán, su maestro y amigo, en ocasión del Primer Congreso Internacional de Ciencias Aeronáuticas, celebrado en Madrid en 1958.

En 1960, ya como ingeniero investigador integrado en el INTA, y profesor a cargo del curso de mecánica de fluidos en Aeronáuticas, Gregorio Millán le propuso que definiera el criterio de validez de la teoría introducida por Burke y Shumann en 1928, para analizar llamas de difusión. Estas son las de los motores Diesel o de reacción, en las que el combustible y el oxígeno se unen en la zona de combustión, a diferencia de las llamas premezcladas, propias de las deflagraciones, en las que el combustible se mezcla con el oxígeno antes de la combustión.

La dificultad de la combustión supersónica no está en la cinética química, sino en el proceso de mezcla

"Se suponía que, siendo la velocidad de reacción infinitamente rápida, la zona de reacción resultaba infinitamente delgada. Con esta hipótesis, encontramos la estructura asintótica de la llama para tiempos químicos pequeños frente a los tiempos de difusión. Pero sólo en 1961, con ayuda del ordenador que entonces llegó a la Junta de Energía Nuclear (JEN), pudimos resolver el problema original no lineal en un caso particular."

Tras una estancia en el Instituto de Tecnología de California en 1963, y la presentación de su tesis doctoral en 1966, la mayor parte de su actividad investigadora durante los sesenta y parte de los setenta pertenece a la "literatura gris", en el entorno de contratos con organismos de las Fuerzas Aéreas de Estados Unidos, y la OTAN, por ejemplo: "Llamas de difusión y combustión supersónica" o "Parámetros de lanzamiento para sondas espaciales, lunares, cometarias y planetarias".

"En la combustión supersónica se busca mezclar el combustible con el aire ambiental que viene hacia el avión sin apenas decelerar el aparato, para evitar la generación de altas temperaturas que acarrean problemas de materiales. Pronto descubrimos que la dificultad de la combustión supersónica no estaba en la cinética química, sino en el proceso de mezcla: cuando uno inyecta un combustible gaseoso en una corriente de oxígeno el flujo es turbulento."

Los problemas de turbulencia que se generan en el flujo supersónico aún no han sido resueltos. Con técnicas de observación avanzadas, tomando más de 8000 fotos en un segundo, se visualizó la capa de torbellinos generada cuando entra un chorro de combustible en el aire. "Se observaron torbellinos anulares discretos, que aumentaban de tamaño, de escala, por apareamiento. Existía un mecanismo de generación de torbellinos grandes, responsable del crecimento de la capa de mezcla. Fueron estas estructuras coherentes, presentes en la mezcla turbulenta, el primer orden observado en el caos que representaban los flujos turbulentos: en el flujo supersónico se daba una mezcla macroscópica generada por los torbellinos grandes, pero no había mezcla asociada a los torbellinos pequeños. Sólo recientemente, en 1993, se realizó con éxito en Rusia una experiencia de combustión supersónica eficaz. No se sabe si se ha logrado o no en Estados Unidos. Lo que sí es cierto es que existe un programa para investigar la combustión supersónica."

Cuando se le pregunta sobre su colaboración en proyectos secretos —ha sido consultor de la NASA y del Laboratorio Nacional de Los Alamos—, este académico demora la respuesta y termina admitiendo con sorna: "He participado en ciertos proyectos... bueno, aunque actuaba dentro del núcleo duro de la investigación, como los asuntos relacionados con la combustión supersónica se consideran estratégicos, yo participaba, sí, pero casi como un observador."

Menciona las peculiares condiciones de su estancia en el laboratorio supersecreto de Los Alamos. "Nunca entré en el despacho del matemático con el que trabajaba. El venía al mío que estaba fuera del área de acceso restringido. Sí he colaborado con algunos laboratorios para los que hacía falta 'clearence'".

—¿Y?

—Je, je, je, ríe, y queda claro que no habrá respuesta para quien no la infiera de la ecuación de Liñán.

Ciencia y sociedad

Fisiología microbiana

Segregación temporal

Las plantas no son los únicos organismos capaces de realizar la función de la fotosíntesis. Las cianobacterias cumplen también esa labor. De acuerdo con el registro fósil, este grupo de eubacterias ha existido sobre la Tierra desde hace unos 3500 millones de años. Por lo que sabemos, las cianobacterias primitivas fueron los primeros organismos que emplearon el agua como fuente de electrones para la generación del poder reductor requerido en la fotosíntesis, proceso que comportaba la liberación de oxígeno, uno de los hechos cruciales para la evolución de la vida en nuestro planeta.

Muchas cianobacterias contribuyen también a la economía del nitrógeno de hábitats acuáticos y terrestres, gracias a su capacidad fijadora de nitrógeno atmosférico. La reducción de dinitrógeno en amonio durante la fijación viene catalizada por la nitrogenasa, un sistema enzimático exclusivo de bacterias, que es muy sensible al oxígeno. La presencia en el mismo organismo de dos sistemas metabólicos antagónicos —fotosíntesis generadora de oxígeno libre y fijación de nitrógeno sensible al oxígeno— parece una paradoja.

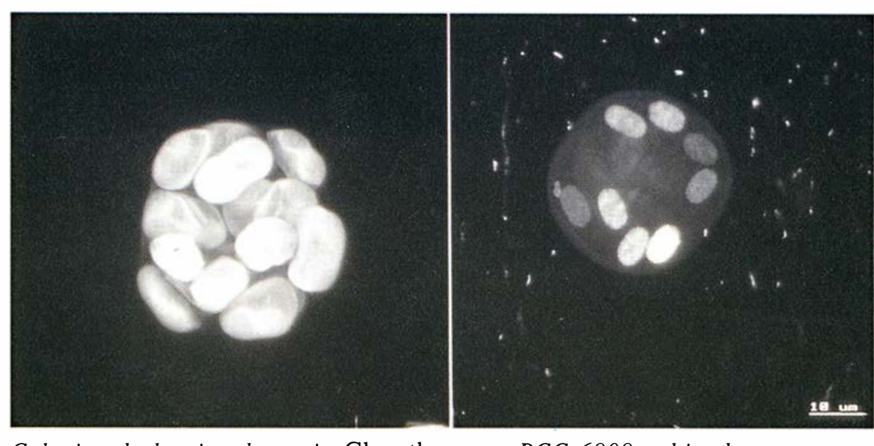
De acuerdo con el tipo de adaptación desarrollado para proteger la nitrogenasa, del oxígeno generado por fotosíntesis, podemos distinguir dos grupos de cianobacterias fijadoras de nitrógeno. Muchas cianobacterias filamentosas llevan a cabo una separación *espacial* de la fijación: ésta se realiza en los heterocistos, unas células especiales, en tanto que las células vegetativas operan la fotosíntesis. El resto de las cianobacterias filamentosas y unicelulares desempeñan ambas funciones —fotosíntesis y fijación— en células indiferenciadas. Se ha propuesto un mecanismo general, para este último grupo, basado en la separación *temporal* de ambos procesos. En condiciones naturales o en cultivos mantenidos con ciclos de luz y oscuridad, la actividad nitrogenasa estaría confinada a la noche (o a la fase oscura), evitando así la inactivación por el oxígeno generado durante el día mediante fotosíntesis.

El mecanismo de separación temporal parece darse en *Gloeothece* sp., una cianobacteria unicelular, según lo observado en poblaciones naturales desarrolladas en sustratos de piedra caliza y en cultivos estancos (es decir, sistemas de cultivo cerrados que funcionan a partir de un aporte inicial de nutrientes), mantenidos en ciclos de luz y oscuridad. Ahora bien, no se trata de una segregación imprescindible para el crecimiento de *Gloeothece* con nitrógeno atmosférico; ésta puede también cultivarse con luz continua. Coexisten, pues, ambos procesos en la cianobacteria. Más aún, de acuerdo con recientes investigaciones la segregación temporal parece ser fruto de ciertas condiciones fisiológicas, y no de un mecanismo de protección *per se*.

Nosotros hemos trabajado con *Gloeothece* sp., estirpe PCC 6909. Esta cepa crece lentamente y con síntomas de deficiencia nutricional cuando se cultiva en un sistema estanco al que se ha incorporado un medio mineral estándar, carente de nitrógeno combinado y sólo con nitrógeno atmosférico. Las tasas de fijación son bajas. Se atribuye esa situación a un funcionamiento inadecuado de la nitrogenasa en condiciones de excesiva concentración de oxígeno, que promueven una deficiencia de nitrógeno. Pero nosotros hemos demostrado, en investigaciones iniciadas en colaboración con L. J. Stal, de la Universidad de Amsterdam, y luego continuadas en el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, que lo que existe en los cultivos estancos es una deficiencia de azufre, no de nitrógeno.

Lo mismo que otras muchas cianobacterias, *Gloeothece* sp. PCC 6909 desarrolla una vaina extracelular compleja, que rodea grupos de hasta 16 células y se organiza en capas. Presenta, en la vaina, polisacáridos sulfatados, que, aunque comunes en algas eucariotas, son raros entre procariotas. La cantidad de sulfato que se encuentra en la vaina de *Gloeothece* constituye alrededor del 15 % en peso del polisacárido, pero la cianobacteria no puede emplearlo como fuente de azufre para su crecimiento.

El aprovechamiento del sulfato existente en el medio de cultivo para la formación de la vaina provoca los síntomas de deficiencia nutricional. Cuando incorporamos, en los cultivos estancos, sulfato magnésico a cierta concentración, el sulfato desaparece del medio de cultivo en cuestión de uno o dos días, y aparece asociado a la vaina. Se trata de un proceso que, estimulado por la luz, ocurre también si el medio de cultivo contiene nitrato como fuente de nitrógeno. Durante la asimilación,



Colonias de la cianobacteria Gloeothece sp. *PCC 6909 cultivada con exceso de $CaSO_4 \cdot 2H_2O$* (izquierda) *y con medio BG11°, deficiente en sulfato* (derecha). *Se pueden observar las diferencias morfológicas inducidas por la ausencia de sulfato. Las vainas sintetizadas en presencia de abundante sulfato son compactas y agrupan estrechamente pares de células, que son los que se observan en la imagen. En ausencia de sulfato existe una sola vaina común, más difusa, que permite observar las células individuales. (Imágenes obtenidas con microscopía láser confocal.)*

mientras exista sulfato libre en el medio, se asistirá a una recuperación fisiológica transitoria, en que se sintetizan de nuevo los pigmentos y se estimula la actividad nitrogenasa (en cultivos sin nitrato).

El estudio morfológico y ultraestructural de células deficientes muestra que las alteraciones fisiológicas provocadas por la ausencia de azufre se relacionan, asimismo, con profundas alteraciones estructurales de la célula: vaina desorganizada y difusa, acumulación de diversos tipos de materiales de reserva (cianoficina, glucógeno y polihidroxibutirato) y desintegración de las membranas fotosintéticas.

La utilización de un exceso de yeso ($CaSO_4.2H_2O$), una fuente escasamente soluble de sulfato, permite mantener una concentración alta de sulfato en solución, concentración que, además, permanece constante, pues la cantidad de sulfato empleada en la formación de la vaina se repone con la continua disolución del yeso. El resultado es un crecimiento óptimo de *Gloeothece*.

La presencia de altos niveles de calcio resulta más beneficiosa que la de magnesio, que parecen tener un efecto tóxico, lo que no debe sorprendernos, ya que las cianobacterias de este género están muy bien adaptadas a substratos calizos. Incluso las costras negras sulfatadas que la contaminación atmosférica produce sobre la superficie de los materiales pétreos de catedrales constituyen un excelente componente del medio de cultivo para *Gloeothece*, merced a su alto contenido en yeso.

La morfología y la ultraestructura de las células cultivadas con yeso difieren por completo de las observadas en células deficientes. Las células de aquellos cultivos muestran un aparato fotosintético bien organizado y un número muy inferior de inclusiones y de gránulos de glucógeno. El efecto ejercido en la estructura de la vaina es también notable. Con una organización bien definida en bandas concéntricas, la vaina sintetizada en presencia de sulfato engloba estrechamente a las células.

El uso de la técnica de cultivo continuo posibilita, asimismo, un crecimiento equilibrado de *Gloeothece*. Se produce la síntesis paralela de los distintos componentes celulares gracias al aporte continuo de sulfato que entra en el medio de cultivo. *Gloeothece* crece así limitado por el aporte de sulfato al medio. Una vez alcanzadas las condiciones de equilibrio, los parámetros de cultivo pueden mantenerse constantes y controlados de forma casi indefinida. La aplicación de distintos tipos de ciclos de luz y oscuridad ha permitido comprobar que *Gloeothece* sp. confina la actividad de fijación de nitrógeno al período de luz en ciclos de luz y oscuridad, simultáneamente por tanto a la producción de oxígeno por fotosíntesis. Lo mismo parece ocurrir en cultivos estancos con suficiente sulfato.

Resulta, pues, evidente que la segregación temporal no es el mecanismo principal de protección de la nitrogenasa, sino un efecto de circunstancias fisiológicas determinadas, en las que, debido a la capacidad de *Gloeothece* de acumular sulfato en la vaina, la presencia de sulfato disponible en el medio desempeña un importante papel. Quedan por definir las bases de tal mecanismo de protección, que es capaz de superar, por tanto, el efecto inhibidor del oxígeno generado por fotosíntesis y el existente en una atmósfera aerobia.

J. J. ORTEGA CALVO, X. ARIÑO Y C. SAIZ JIMENEZ
Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología, CSIC, Sevilla

Arqueología romana

Balneario de Caldas

Gracias al trabajo realizado en las últimas campañas de excavación y a los nuevos hallazgos resultantes de las mismas se asienta sobre base segura nuestro conocimiento de la arqueología de Caldas de Malavella (cerca de Gerona, en el noreste español). La villa, hoy como ayer, debe su existencia a unas extraordinarias fuentes de agua caliente.

Se concedía, con datos que parecían irrefutables, que Caldas había sido, en la antigüedad, *Aquae Voconiae*, nombre transmitido exclusivamente a través de antiguos itinerarios o de testimonios epigráficos relacionados con la vía romana (*tabula* de Peutinger, vasos apolinarios). Un basamento de estatua hallado en la localidad permitía suponer que había sido un municipio, vale decir, una pieza clave del control del territorio, el último grado en la administración del imperio.

La existencia de una gran piscina termal y de sus dependencias en el Puig de Sant Grau, en buen estado de conservación aunque insuficientemente explicadas, y los datos relativos a un edificio similar, destruido parcialmente, en el Puig de les Animes, daban fe del papel determinante del agua en la dinámica de la ciudad.

Todo ello —antigua denominación, estatuto administrativo, relación con la Vía Augusta e importancia del agua— resultaba, a la postre, escaso e inconexo bagaje para adentrarnos en el pasado romano de Caldas. Pero ha bastado un hallazgo fortuito y dos campañas de excavaciones y prospecciones planificadas para corregir errores graves y avanzar en la reconstrucción de los orígenes y la evolución del lugar.

La recuperación de otro pedestal de estatua nos permitió confirmar la categoría urbana de la ciudad y comprobar que Caldas de Malavella no fue nunca *Aquae Voconiae*, sino *Aquae Calidae*, tal como se recogía en la documentación medieval y, en última instancia, ha pervivido. Este descubrimiento sorprendente servía para separar la *urbs* de la *mansio* (estación de servicio de la vía romana), que hay que situar más hacia el oeste.

Identificado su nombre auténtico, podíamos rastrearlo en las fuentes, que aportaron datos, valiosísimos, sobre la evolución del asentamiento. Según se desprende de la *Historia Natural* (III, 23) de Plinio el Viejo, Caldas sería, durante el principado de Augusto, ciudad estipendaria. Ptolomeo, en su *Guía geográfica* (II, 69), nos recuerda solamente su situación entre las ciudades de los ausetanos junto a *Gerunda*.

Las excavaciones arqueológicas se han centrado en la explicación y limpieza del conjunto monumental del Puig de Sant Grau, en una serie de prospecciones y sondeos en diferentes zonas del centro de la villa y en la excavación de una interesante necrópolis tardo-romana en la zona meridional del pueblo actual. Podemos trazar ya la evolución de *Aquae Calidae* desde los momentos iniciales de la conquista romana hasta los albores de la Edad Media.

De la lectura diacrónica de la estratigrafía puesta al descubierto en el Puig de Sant Grau inferimos la presencia, sobre la roca natural, de una significativa concentración de material arqueológico propio de los siglos II y I a. C.: cerámica de barniz negro, cerámicas ampuritanas, cerámica ibérica pintada, ánfora itálica y otras, que nos hablan de una comunidad humana asentada y dinámica.

Sobre este lugar, durante el principado de Claudio, de los años 41 al 54 de nuestra era, se construyó un gran edificio termal aprovechando la proximidad de una de las fuentes. Es



Gran piscina y áreas circundantes después de los trabajos de excavación y limpieza (vista desde el nordeste)

una obra plenamente romana en su concepción y técnica constructiva, de la que se conservan muchos elementos. El central es la gran piscina rectangular, con escaleras en tres de los cuatro costados, rodeada de unos pasillos cubiertos y, dispuestas simétricamente en los lados este y oeste, tres habitaciones. Hacia el norte, un muro ciego hacía de pared perimetral mientras que, hacia el sur, a través de unos arcos, se accedía a otro pasillo cubierto con bóveda de cañón, con una habitación en cada uno de los extremos y más a mediodía, hay que suponer, había otras salas de servicio y la entrada del edificio. Este sector desapareció hace muchos siglos, sin que quede la menor posibilidad de recuperarlo.

De las tres dependencias que se hallan dispuestas al este de la piscina, la central, mucho mayor y dotada de una triple puerta, sacralizaba la fuente de agua caliente, siendo menos clara la función de las estancias laterales. Enfrente, se repetía el esquema, pero la finalidad de las habitaciones era distinta. En la situada en el ángulo sudoccidental, con unas escaleras de piedra arenisca que facilitaban el descenso, se hallaba el servicio del desagüe de la gran piscina. La cimentación de los arcos, la estructura periférica y el hallazgo en las escombreras occidentales del yacimiento de gran cantidad de vidrio plano nos invitan a restituir todo el espacio cerrado con bóveda de aristas y grandes ventanales. El resultado es un monumento termal distinto de los que podemos encontrar en cualquier otro sitio. Se trata de un balneario que pretendía aprovechar el valor curativo de unas aguas medicinales, sacralizadas como queda de manifiesto en la planta del conjunto y en la disposición privilegiada de la fuente.

Hacia finales del siglo segundo o muy a principios del tercero, en época severiana (192-235), el edificio sufrió profundas remodelaciones, que comportaron la desaparición de las tres habitaciones del lado occidental sustituidas por un muro, ciertas modificaciones de las salas del lado este, reformas de los arcos de acceso y construcción de un gran depósito de agua de forma absidiada en el sector sudoeste de la parte conservada del monumento. Desconocemos los motivos de esas reformas que no afectaron excesivamente la planta general. En un momento impreciso del siglo V se produjo, finalmente, la crisis del gran edificio termal.

Los datos históricos y arqueológicos apoyan la tesis según la cual, gracias a las fuentes, la proximidad de la vía y una disposición central con respecto a los pueblos del contorno, Caldas se erigió en el centro político de los íberos del territorio con entidad propia a cambio de un estipendio. La importancia del agua y su situación privilegiada aceleraron el proceso de romanización, que se nos hace patente con la construcción del conjunto del Puig de Sant Grau. Los flavios (69-96) convertirían la ciudad tributaria en municipio de derecho latino, una ciudad de la cual sólo conocemos monumentos termales y hallazgos sueltos poco significativos que nos hace pensar en una estructura urbana escasamente desarrollada. Tal vez este hecho explicaría la crisis municipal de la Baja Antigüedad, al desaparecer como tal y quedar integrada con su territorio en *Gerunda*. Sin embargo, la necrópolis de la calle de Sant Esteve nos muestra con absoluta claridad que la pérdida de papel político destacado no significó la desaparición del lugar.

JOSEP MARIA NOLLA
Universidad de Gerona

Oxido nítrico

Fisiopatología

El óxido nítrico (NO) se ha convertido en los últimos años en una de las moléculas más estudiadas y fascinantes de la bioquímica. Este mediador desempeña un importante papel en múltiples procesos fisiológicos de los mamíferos. Su creciente rango de funciones abarca, que se sepa por ahora, la regulación de la presión arterial, coagulación sanguínea, motilidad gástrica, respiración, filtración glomerular, neurotransmisión, memoria, crecimiento y desarrollo de la médula ósea y respuesta inmunitaria mediada por células.

Sin embargo, en determinadas situaciones —estrés oxidativo, generación de radicales de oxígeno altamente reactivos— el óxido nítrico puede convertirse en un agente citotóxico. Un mecanismo predominante por el que este fenómeno ocurre es a través de la reacción del NO con el anión superóxido para generar peroxinitrito, un potente agente nitrante de proteínas.

El NO se genera en las células a través de la oxidación del aminoácido L-arginina por la enzima óxido nítrico sintetasa (NOS) de forma dependiente de NADPH. Cofactores de la enzima necesarios en la producción del mismo son hemo, flavin adenin dinucleótido, flavin mononucleótido, tetrahidrobiopterina (BH_4) y, en algunos casos, calmodulina y calcio.

Se han caracterizado, al menos, tres diferentes formas de la enzima NOS. Dos de ellas se expresan de manera constitutiva y se han aislado una de células endoteliales (NOSe) y la otra de cerebro (NOSn). Estas isoformas necesitan calcio y calmodulina para su actividad. La tercera, una NOS inducible por citocinas (NOSi), se aisló inicialmente de macrófagos y su actividad es independiente de calcio. La NOSi por citocinas, que

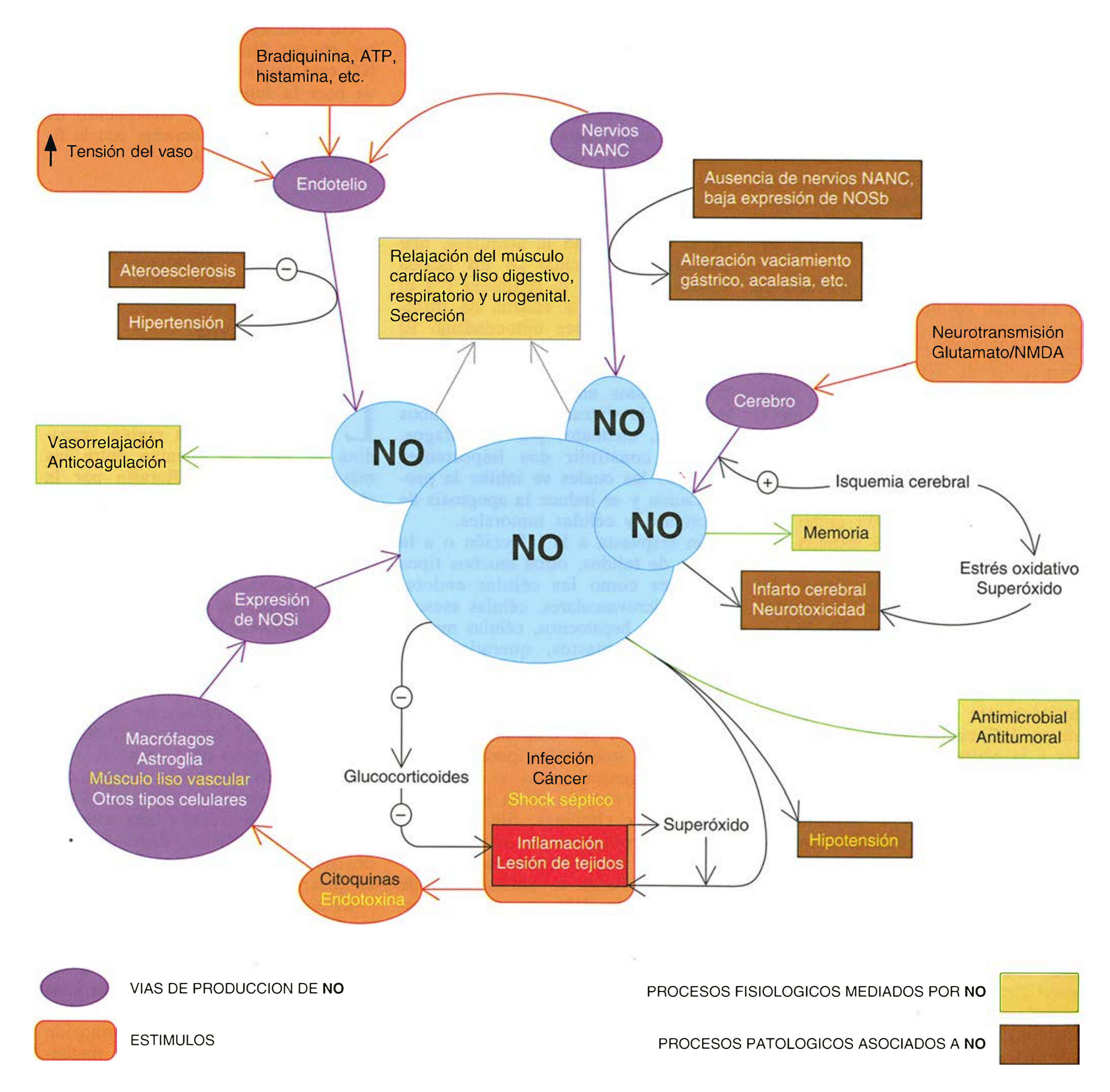
contiene calmodulina fuertemente unida, permanece activa en presencia de niveles basales de calcio. La forma inducible es capaz de generar cantidades de NO muy superiores a las formas constitutivas.

Aunque las tres formas poseen actividades específicas similares, los distintos niveles de expresión y el hecho de que la actividad de las formas constitutivas sea dependiente de calcio pueden justificar las diferencias observadas. Las tres enzimas NOS se transcriben a partir de genes distintos, aunque guardan un considerable grado de homología de secuencia.

La forma endotelial se activa a través del influjo de calcio controlado por canales de calcio de la membrana plasmática. Estos canales se abren en respuesta a diversos estímulos hormonales y agentes farmacológicos: bradiquinina, acetilcolina, ADP, ATP e histamina. En algunos tejidos, el influjo de calcio dentro de las células endoteliales de los vasos está controlado directamente por neuronas no adrenérgicas y no colinérgicas (NANC). Más comúnmente, dicho influjo parece estar regulado por el flujo sanguíneo; cuando aumenta la tensión que soportan los vasos (fuerzas de rozamiento), se abren los canales.

El óxido nítrico producido en las células endoteliales difunde en todas las direcciones. Cuando alcanza el músculo liso vascular adyacente, estimula la síntesis de guanosín monofosfato cíclico (GMPc) tras activar la guanilato ciclasa soluble. El aumento de los niveles de GMPc provoca un descenso de los niveles intracelulares de calcio y, en consecuencia, la relajación de la musculatura lisa vascular y la dilatación del vaso, que se manifiesta en una disminución de la presión arterial.

Si está bloqueada la producción de NO en estados patológicos —ateroesclerosis, por ejemplo—, decrece el grado de relajación de la musculatura lisa del vaso, con posibilidad de que aparezca alguna forma de hipertensión. El NO de las células endoteliales también difunde hacia el in-



terior del vaso, donde inhibe la adhesión y agregación de las plaquetas, disminuyendo la tendencia de la sangre a coagular.

En cierto tipo de neurotransmisión, el glutamato liberado de una neurona estimulada se une y activa un receptor de NMDA de la neurona adyacente, provocando la apertura del canal de dicho receptor, que permite la entrada de calcio en la neurona. Ahí, el calcio se une a la calmodulina y ésta se asocia a la enzima óxido nítrico sintetasa localizada en el cerebro, proteína que activa la producción de NO.

No se conoce bien la función exacta del NO neuronal. A tenor de diversos resultados experimentales, el óxido nítrico actuaría como un mensajero retrógrado; es decir, se difundiría hacia la neurona presináptica, donde se uniría al grupo hemo de la guanilato ciclasa para así activar dicha enzima. La activación elevaría los niveles de GMPc, que estimularía o bloquearía la liberación del neurotransmisor y la respuesta postsináptica. Se trata de una hipótesis del mayor interés, pues el NO podría intervenir en la potenciación o depresión a largo plazo de la memoria.

El NO está también implicado en la migraña, epilepsia, neurotoxicidad y enfermedades neurodegenerativas. En la isquemia cerebral, aunque la formación de NO es inicialmente protectora al inducir perfusión colateral, participa, sin embargo, en el daño del tejido (infarto) tras la reoxigenación, debido a la presencia de radicales de oxígeno y a la formación de peroxinitrito.

El óxido nítrico actúa como mediador en neuronas del sistema nervioso periférico NANC. Se han encontrado neuronas de este tipo en los sistemas cardiovascular, urogenital, respiratorio y digestivo. El NO se revela como uno más de los muchos neuromediadores que relajan el tono de la musculatura lisa, cardiaca y posiblemente esquelética; ejerce, en efecto, influencias inotrópicas (relativas a la contracción) negativas sobre el miocardio, estimula la erección del pene por relajación de la musculatura lisa del cuerpo cavernoso y regula la relación ventilación-perfusión en los bronquios y la peristalsis del intestino. En general, para mediar tales efectos, el NO liberado por las neuronas NANC actúa de forma concertada con el NO procedente de otras fuentes (células endoteliales y epiteliales, o exógeno).

No acaba ahí el influjo del óxido nítrico, que modula la producción de insulina por las células β-pancreáticas, regula la producción de renina y la perfusión glomerular del riñón e inhibe la biosíntesis de adrenocorticoides de la corteza adrenal. En fenómenos fisiopatológicos como la acalasia, la estenosis pilórica hipertrófica infantil y la enfermedad de Hirschprung se ha demostrado la ausencia de nervios NANC o bien una disminución de la expresión de la enzima NOSn.

El papel que el NO desempeña en el sistema inmune difiere de sus funciones en neuronas y vasos sanguíneos. La transcripción del gen de la enzima óxido nítrico sintetasa inducible de macrófagos está controlada, positiva y negativamente, por citocinas y factores de crecimiento. Esta enzima NOSi genera cantidades importantes de NO durante varias horas después de haberse sintetizado. Aunque el óxido nítrico se difunde presumiblemente en cualquier dirección, la elevada proximidad entre el macrófago y la célula diana provoca la entrada masiva de NO en esta última, donde se une a los centros hierro-azufre de algunas enzimas importantes en el metabolismo energético de la célula como la aconitasa, que participa en el ciclo de los ácidos tricarboxílicos, y el complejo I y el complejo II de la cadena de transporte de electrones mitocondrial. El NO también inhibe la ribonucleótido reductasa, enzima que convierte ribonucleótidos en desoxiribonucleótidos para la síntesis de ADN. Ambos procesos, mediados por macrófagos, pueden constituir dos importantes vías por las cuales se inhibe la proliferación y se induce la apoptosis de microbios y células tumorales.

En respuesta a la infección o a la lesión de tejidos, otros muchos tipos celulares como las células endoteliales microvasculares, células musculares lisas, hepatocitos, células mesangiales, fibroblastos, queratinocitos, células epiteliales de riñón y pulmón, miocitos cardiacos y condrocitos también tienen la capacidad de ser inducidos por combinaciones de citocinas y endotoxina para producir NO. En general, esto se consigue con la intervención de la enzima inducible por citocinas. Sin embargo, ciertas investigaciones recientes sugieren que las citocinas pueden promover, mediante la estimulación de la síntesis de BH4, la actividad específica de la enzima constitutiva extraída de células endoteliales.

La excesiva producción de NO durante un proceso inflamatorio puede ocasionar cambios fisiopatológicos en el tejido con resultado de lesión. No deja de llamar la atención que los corticosteroides, supresores de inflamación, sean potentes inhibidores de la expresión de la NOSi. Asimismo, algunos estudios han demostrado que el lipopolisacárido de las paredes celulares de bacterias gram-negativas, liberado en el choque séptico, puede inducir la síntesis de NO en células musculares lisas del vaso, provocando una extensa relajación de la musculatura lisa vascular e hipotensión. Los inhibidores de la sintetasa de óxido nítrico restablecen la presión sanguínea normal en modelos animales de sepsis, y podrían quizás emplearse en el tratamiento de la hipotensión asociada al choque séptico y al choque inducido por citocinas de pacientes con cáncer tratados con quimioterapia.

Un conocimiento más detallado de los efectos biológicos en los que el NO está implicado podría ser la llave para la futura aplicación de terapias adecuadas en el tratamiento de las enfermedades asociadas con la fisiopatología del NO.

OCTAVIO HERNÁNDEZ-PERERA
Y SANTIAGO LAMAS
Centro de Investigaciones
Biológicas, Madrid

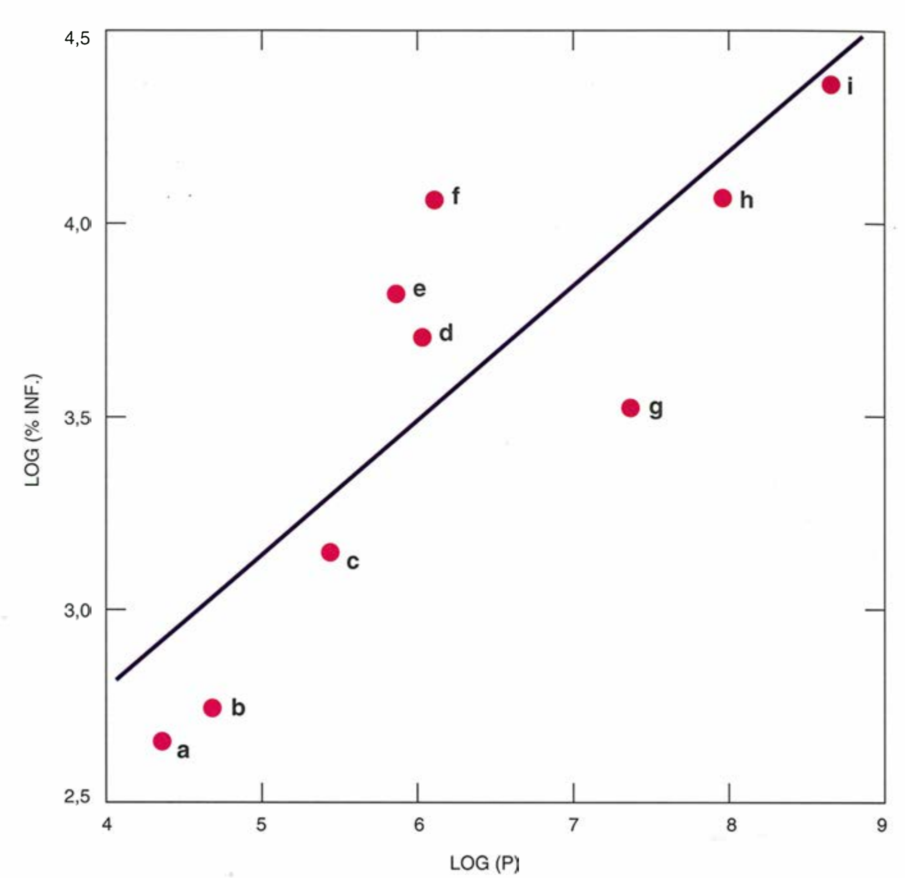
Paleoetología

Pleistoceno inferior de Orce

Los depósitos lacustres del Plio-Cuaternario de la región granadina de Orce se cuentan entre los más importantes de Eurasia por la abundancia, diversidad y excelente estado de conservación de su fauna fósil de grandes mamíferos, así como por el hallazgo en los mismos de las primeras señales de ocupación humana en Europa, en edades comprendidas entre 1.900.000 y 800.000 años atrás.

En esa región, el yacimiento de Venta Micena es el más importante excavado sistemáticamente hasta la fecha. Se formó hace unos 1.650.000 años en una zona de charcas de agua dulce, situadas en torno al lago que por aquel entonces existía en Orce. En él se han recuperado más de 15.000 restos fósiles, dentales y no dentales, pertenecientes a 21 especies de macromamíferos.

El análisis de la razón de tamaño a abundancia en los ungulados de Venta Micena ha puesto de manifiesto que la estructura original de la paleocomunidad se conservó en gran parte durante la fosilización. Las principales pérdidas de información se debieron a los procesos de meteo-



Análisis de regresión mediante mínimos cuadrados entre la proporción de individuos infantiles en que se encuentran representadas las especies de ungulados de Venta Micena y el peso corporal (P) en kilogramos estimado para los ejemplares adultos: Log(% infantiles) = 1,401 + 0,346 Log(P); r = 0,841, F = 16,95 (p 0,004); a: Capra alba, b: Cervidae, *de género y especie sin determinar,* c: Soergelia minor, d: Megaloceros (Megaceroides) solilhacus, e: Equus cf. altidens, f: Bovini cf. Bubalus, g: Stephanorhinus etruscus, h: Hippopotamus major, i: Mammuthus meridionalis

rización en superficie de los huesos, en la etapa previa a su enterramiento, deterioro que afectó más a las especies con dimensiones corporales reducidas.

Por otra parte, de la comparación entre las proporciones en que se hallan representados los diferentes elementos esqueléticos de este yacimiento y las encontradas en diversos tipos de acumulaciones óseas, modernas y arqueológicas, se infiere que Venta Micena se formó como consecuencia de la acumulación, por las hienas, de los huesos en un contexto próximo a sus cubiles de cría.

A lo largo de los últimos años se ha venido prestando particular atención al estudio de las relaciones interespecíficas que se dieron en el seno de la paleocomunidad, y de modo señalado a los fenómenos de predación. Se han encontrado pruebas de que los carnívoros ejercían un fuerte control sobre las poblaciones de ungulados presa. La investigación de la edad, tamaño, sexo y condiciones físicas de los ejemplares abatidos ha permitido establecer un modelo de selección de presas aplicable al registro fósil.

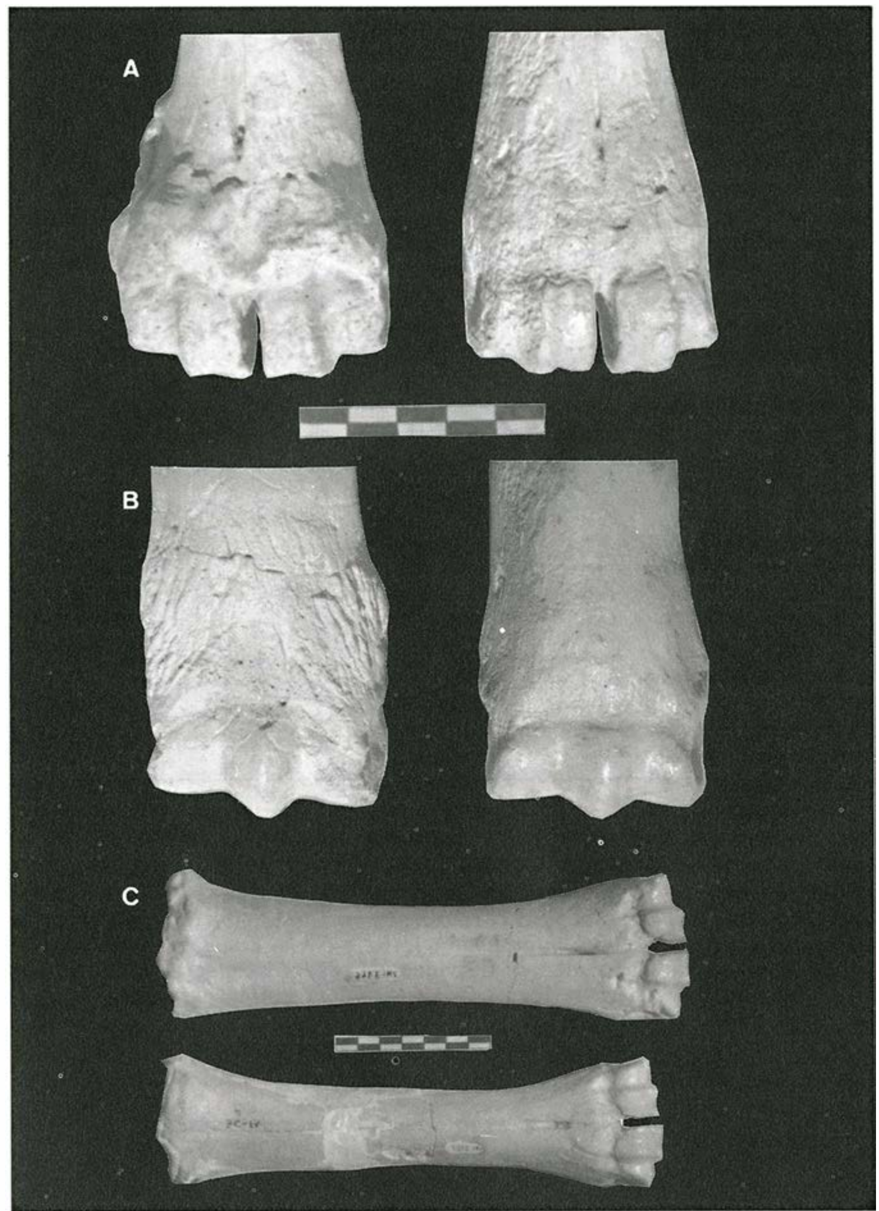
El más importante de tales indicios se ha obtenido a partir del estudio de los porcentajes de individuos infantiles de especies de ungulados. La proporción de ejemplares jóvenes en una población depende de la tasa de natalidad (T_n), que se relaciona de manera inversa con el peso (P) de los individuos adultos de la especie ($T_n \cong P^{-0,25}$), y de la duración de la infancia (D_i), que se relaciona directamente ($D_i \cong P^{0,25}$); ambos factores se compensan entre sí, de forma que dicha proporción es constante e independiente del tamaño corporal.

Sin embargo, en Venta Micena, el porcentaje de individuos infantiles de las diferentes especies de ungulados, calculado a partir del análisis de la dentición decidual, muestra una tendencia significativa a aumentar con las dimensiones estimadas de los ejemplares adultos. Ello indica que la predación se centraba sobre los individuos jóvenes, más vulnerables, en el caso de especies de mayor tamaño, como el hipopótamo *(Hippopotamus major)* y el elefante *(Mammuthus meridionalis)*. Así, esta última se encuentra representada en la asociación por un número mínimo de 5 individuos, de los cuales 4 (el 80 %) eran infantiles y el restante sería un adulto senil, con los molares desgastados, que a su muerte sería carroñeado por las hienas y los homínidos; el peso corporal de este ejemplar, estimado en 9,5-10 toneladas a partir del perímetro de la sección de las diáfisis del húmero y el fémur, garantizaría que en vida fuese inaccesible a los predadores. En el caso del hipopótamo, con un peso calculado en torno a 3000 kg, 3 de los 5 individuos (el 60 %) son infantiles y 2 adultos.

En cambio, las especies de menor tamaño, como la cabra (*Capra alba*) y el ciervo pequeño (*Cervidae*, gen. et sp. indet.), con pesos estimados de 75 y 95 kg, respectivamente, tienen los menores porcentajes de infantiles (en torno al 15 % en ambos casos: 2/12 y 3/17), mientras que las especies de dimensiones medias, como el caballo (*Equus* cf. *altidens*; 350 kg) o el ciervo grande [*Megaloceros (Megaceroides) solilhacus*; 380 kg), muestran proporciones de ejemplares jóvenes igualmente intermedias: el 46 % (32/70) y el 42 % (15/36), respectivamente.

Así, estos datos permiten deducir que la acumulación original de los huesos en Venta Micena se produjo, exclusivamente, como consecuencia de la mortalidad ocasionada por los carnívoros sobre las poblaciones de ungulados presa, pudiéndose descartar entonces que los restos proviniesen de los posibles episodios de mortandad catastrófica que se producirían durante los períodos recurrentes de sequía, ya que bajo ese último supuesto la proporción de individuos infantiles no se incrementaría conforme al tamaño corporal de las especies, sino que permanecería más o menos constante.

Esta hipótesis se encuentra avalada por el hallazgo de abundantes huesos de caballo, ciervo y búfalo, que muestran indicios de osteopatologías severas, las cuales afectarían a la capacidad de huida ante el acoso de los predadores. Hay varios casos espectaculares de artrosis en las epífisis distales de los metapodios, sobrecrecimientos óseos importantes en las diáfisis y anomalías en las facetas articulares de las epífisis proximales. El porcentaje de individuos afectados se ha estimado en aproxi-



Osteopatologías identificadas en los metapodios de ungulados. Procesos de artrosis en las epífisis distales de A: *un metacarpiano de ciervo* [Megaloceros *(megaceroides)* solilhacus] *(*izquierda: *hueso afectado;* derecha: *hueso normal) y* B: *un metatarsiano de caballo* (Equus cf. altidens) *(*izquierda: *hueso afectado;* derecha: *hueso normal).* C: *dimorfismo sexual en los metacarpianos del búfalo de Venta Micena* (Bovini cf. Bubalus) *(*arriba: *macho;* debajo: *hembra)*

madamente un 30 %, proporción que resulta muy alta si se la compara con la escasa incidencia de estas patologías en las poblaciones salvajes de ungulados modernos. Con las condiciones físicas disminuidas, estos ejemplares eran seleccionados de forma activa por los carnívoros.

Una tercera línea de prueba se obtiene a partir del análisis de la proporción en la que se encuentran representados ambos sexos en el búfalo de Venta Micena. Estos grandes rumiantes, con un peso estimado de 370-750 kg, mostraban un claro dimorfismo sexual en el tamaño de los metacarpianos, lo que ha permitido estimar las proporciones de machos y hembras en la asociación fósil: 26 % y 74 %, respectivamente (esto es, aproximadamente 1:3). Tal diferencia sugiere que los predadores seleccionaban a las hembras por su menor tamaño, así como por la ausencia de cuernos, carácter que resulta muy primitivo en los bóvidos.

No parece fácil establecer cuál sería el principal predador de esta paleocomunidad. En la asociación fósil se han preservado cuatro especies de grandes carnívoros: un tigre con dientes en forma de sable (*Homotherium latidens*), con un peso medio de 250 kg, un félido con caninos en forma de puñal de tamaño similar al leopardo (*Megantereon whitei*; 55 kg), una gran hiena (*Pachycrocuta brevirostris*; 70-120 kg) y un cánido semejante al moderno licaón [*Canis (Xenocyon) falconeri*; 30 kg].

De esos depredadores en potencia se puede descartar, en principio, el machairodontino, de menor tamaño. Si tenemos en cuenta que sus hábitos de caza serían similares a los del leopardo, no debería entonces capturar presas de tamaño significativamente superior al propio. Respecto a los ungulados de mayor peso, por encima de la tonelada, como el rinoceronte (*Stephanorhinus etruscus*; 1500 kg), el hipopótamo y el elefante, los únicos predadores capaces de abatirlos serían las hienas y, sobre todo, los grandes félidos con dientes de sable, ya que hoy sólo los leones y las hienas manchadas pueden cazar ejemplares jóvenes o gravemente enfermos de especies con tales dimensiones corporales.

Para los restantes ungulados, los candidatos idóneos parecen ser los cánidos, en función de la alta frecuencia de osteopatologías detectada. Presumiblemente, perseguían sus presas a la carrera durante largas distancias, hasta conducirlas al agotamiento, tal y como hacen hoy en día los perros salvajes africanos, efectuando entonces una alta selección sobre los ejemplares que presentasen deficiencias locomotrices.

PAUL PALMQVIST
Dpto. de Geología
de la Universidad de Málaga

BIENVENIDO MARTÍNEZ NAVARRO
Museo de Prehistoria
y Paleontología de Orce (Granada)

Ciclo climático

Variaciones en el Atlántico Norte

En el transcurso de los últimos millones de años, el clima de la Tierra ha oscilado entre épocas glaciales, durante las cuales los casquetes polares alcanzaban una extensión máxima en las altas latitudes, y épocas interglaciales, semejantes a la que vivimos actualmente. Tales cambios climáticos tienen que ver con las variaciones de los parámetros orbitales de la Tierra (precesión de los equinoccios, oblicuidad del eje y excentricidad de la elipse terrestre en torno al Sol), que modulan la canti-

dad de energía solar recibida por nuestro planeta y que actúan en una escala temporal de varios millares a varios decenas de millares de años.

Las variaciones climáticas resultantes han comportado fluctuaciones del volumen de hielo almacenado en los casquetes polares y, por tanto, del nivel de los mares. Las fluctuaciones han quedado archivadas en la proporción de isótopos de oxígeno que encontramos en los caparazones de los foraminíferos y otros organismos marinos. Los fenómenos de evaporación y precipitación, vinculados con la expansión y retirada de los hielos polares, provocan una peculiar proporción entre isótopos del oxígeno, o razón de O^{18} a O^{16}. Los resultados obtenidos por los métodos de geoquímica isotópica sugieren que el clima se mantenía bastante estable a lo largo de cada época glacial e interglacial.

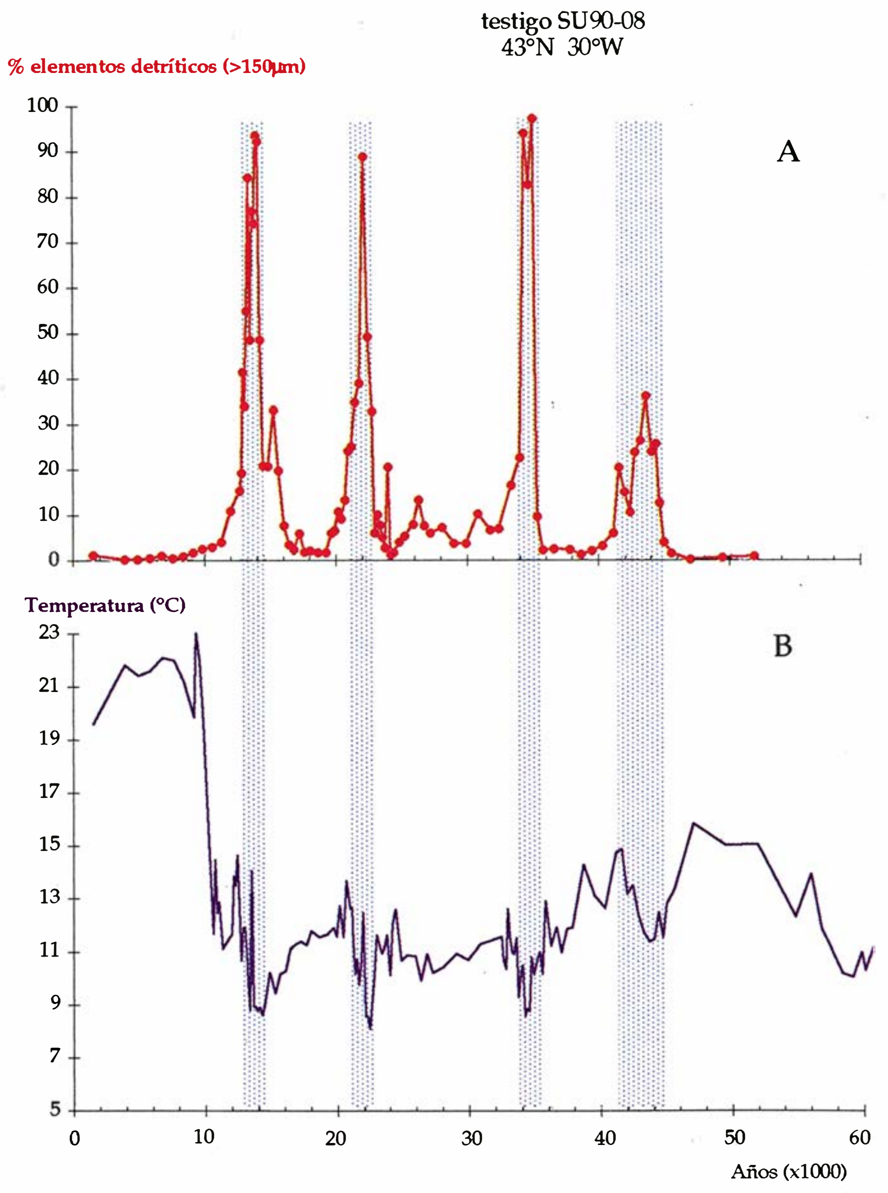
Pero esa regularidad acaba de ponerse en cuestión. Las cosas son mucho más complejas. En efecto, el análisis de muestras de sedimento oceánico y testigos de hielo de la última época glacial (ocurrida hace entre –70.000 y –15.000 años) pone de manifiesto que el Atlántico Norte ha sufrido importantes modificaciones climáticas a lo largo de períodos breves, de sólo varios siglos.

Durante la postrera época glacial, los hielos de las altas latitudes del hemisferio Norte se habían expandido por América del Norte (Laurántida), Groenlandia y Escandinavia. Los hielos presentaban inestabilidades, provocadas en parte por la fusión de su base, y se fueron independizando, más o menos cada 5000 a 10.000 años, en una multitud de icebergs. Estos últimos transportan, junto con el hielo, una gran cantidad de elementos detríticos arrancados a los continentes, devueltos al océano entre 45 y 50 grados de latitud Norte durante el deshielo. Los deshielos masivos de los icebergs quedan así registrados en el sedimento a través del material detrítico depositado.

Tales episodios transcurren en un intervalo temporal bastante corto, en menos de 1000 años, y dejan su impronta en la circulación oceánica global. En efecto, la corriente del Golfo arrastra las aguas calientes y saladas ecuatoriales hacia el norte, donde se enfrían y aumentan de densidad. Por encima de los 60 grados de latitud Norte se forman las aguas profundas que invaden después todas las cuencas oceánicas. La llegada súbita de agua dulce, procedente de los icebergs, provoca una disminución de la densidad de las aguas superficiales, modifica sus características hidrológicas (decaen los valores de temperatura, salinidad y densidad) y, en consecuencia, condicionan la formación de aguas profundas. Los análisis del polen realizados de muestras lacustres en América del Norte y Europa revelan que, durante estos episodios de deshielo, sufrieron profundos cambios las temperaturas continentales y la pluviosidad.

Creíase hasta ahora que esas variaciones climáticas tan bruscas ocurrían sólo en las épocas glaciales. Idea que acaba de desmentirse tras los análisis isotópicos del oxígeno realizados en muestras de hielo de Groenlandia (proyecto GRIP). De acuerdo con los mismos, el Eemiense, la última época interglacial que se extiende entre hace 128.000 y 113.000 años, experimentó también una variabilidad climática rápida cuando sólo había en el hemisferio Norte el casquete de hielo de Groenlandia. Estos episodios de cambio en época interglacial, que pudieron durar de 70 a 5000 años, rebajaron las temperaturas, entre tres y 10 grados, por debajo de las que existían al principio del Eemiense. Pero, según demostraba el proyecto GISP2, eso no se cumplía en muestras de hielo vecinas pertenecientes al Eemiense también.

Con el fin de dilucidar la cuestión, analizamos la última época interglacial en dos muestras de sedimento marino, procedentes una del mar de



Variaciones del contenido en material detrítico (A) *y de la temperatura* (B) *en un testigo sedimentario del Atlántico Norte durante los últimos 60.000 años. Cada uno de los deshielos masivos* (zona punteada) *se registra por un aumento del material detrítico y una bajada de temperatura*

Noruega y otra del Atlántico Norte. Examinamos los cambios de composición isotópica del oxígeno de los foraminíferos y los registros micropaleontológicos. Observamos que la temperatura y la salinidad de las aguas superficiales del mar de Noruega habían bajado bruscamente hace 123.000 años, en pleno Eemiense, en tanto que el Atlántico Norte sólo revelaba una leve caída de temperatura (4 grados en el mar de Noruega frente a 1,5 grados en el Atlántico Norte).

La bajada de la temperatura y salinidad en el mar de Noruega puede asociarse con una disminución de la intensidad de la circulación termohalina, producida a su vez por variaciones del balance hídrico. En el comienzo del Eemiense, las temperaturas eran de unos dos grados por encima del clima actual y el nivel del mar estaba entre 4 y 7 metros más alto. En consecuencia, el balance hídrico en el mar de Noruega pudo sufrir la influencia de la llegada de agua superficial del Pacífico por el estrecho de Bering, del aumento de las precipitaciones en las altas latitudes y de la fusión del hielo de mar.

Aunque este cambio climático en el mar de Noruega representa una importante modificación climática que afecta las circulaciones oceánicas y atmosféricas, no tiene la amplitud de los acontecimientos evidenciados por el registro de hielo en el proyecto GRIP. Tampoco podemos avanzar ninguna conclusión definitiva sobre la estabilidad del clima durante las épocas interglaciales. El Eemiense, que constituye el período que tiene un clima más caliente que el actual, es una época clave para la comprensión de los cambios climáticos futuros.

ELSA CORTIJO, LAURENT LABEYRIE Y LAURENCE VIDAL
Laboratorio mixto CNRS-CEA
Gif sur Yvette

Ciclo celular

Puntos de contrastación

El proceso conocido como ciclo celular implica la sucesiva duplicación del material constituyente de la célula y el subsiguiente reparto de este material entre las dos células hijas. Con respecto al material genético, el ciclo celular se divide en dos fases alternantes principales: la interfase y la mitosis.

Muy pronto quedó establecido que la interfase del ciclo era el período durante el cual se replicaba el material genético. Así, y en virtud del proceso de replicación semiconservativa, de cada molécula de ADN surgían dos moléculas hijas idénticas.

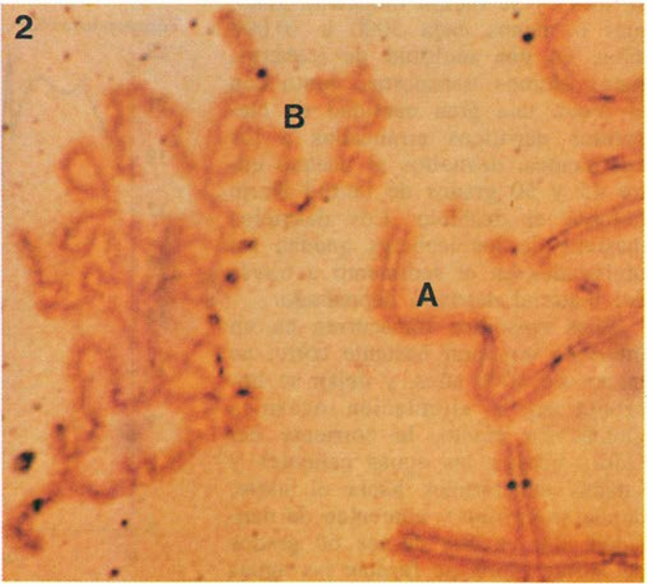
Al analizar la interfase con mayor finura, se observó que la replicación del ADN acontecía sólo durante un período discreto de la misma, el denominado período *S*, o de síntesis. Había en la interfase dos intervalos en los que no se detectaba actividad replicativa; de manera coherente se les llamó períodos vacíos ("gaps") o períodos *G* de la interfase. El primero de ambos, el período G_1, se sitúa tras la mitosis precedente y previo al inicio de la replicación, mientras que el segundo, G_2, se extiende entre el final de la replicación y el comienzo de la mitosis.

La replicación del ADN conlleva topológicamente la aparición de concatenaciones entre las dos hebras hijas de ADN que deberán concluir ante de la segregación anafásica por la enzima topoisomerasa II, pues de otro modo dicha segregación quedaría abortada. (En el ciclo de la división celular, durante la anafase los cromosomas migran hacia los polos de la célula. Lo entenderemos en el párrafo siguiente.)

En la mitosis, el material genético sufre un proceso de condensación (profase) y, tras la ruptura de la envoltura nuclear que lo engloba, aparecerá en forma de unidades discretas —los cromosomas—, que pasarán a disponerse en una placa en la región ecuatorial de la célula (metafase); la formación de la placa se encuentra relacionada con el anclaje de las cromátidas hermanas (las moléculas hijas de ADN) en microtúbulos del aparato o huso mitótico, el cual será el responsable de la segregación de estas cromátidas hermanas hacia polos opuestos (anafase) para la posterior reconstrucción de la envoltura nuclear de los núcleos hijos (telofase) y la división del resto del material celular en las dos nuevas células (citocinesis).



Daño cromosómico (roturas) en una célula metafásica de Muntiacus muntjac *provocado por un agente alquilante, o capaz de sustituir un átomo de hidrógeno por un grupo alquilo. El agente utilizado para evadir el punto de contrastación* G_2 *fue la cafeína*



Fusión celular entre una célula en metafase (A) *y una célula bloqueada en* G_2 *por inhibición de topoisomerasa II* (B). *Mientras que en la primera se observa un eje cromosómico por cromátida, en la segunda ambos ejes cromatídicos hermanos aparecen asociados*

La eficacia del proceso global del ciclo celular se basa en la adquisición evolutiva, por parte de la célula, de una serie de mecanismos de control y de regulación del mismo destinados a asegurar tanto el cumplimiento de la secuencia de eventos como de la cabal ejecución de cada uno de ellos.

Estos mecanismos de control implican la existencia de puntos de comprobación o contrastación del ciclo celular. En esos sitios, la célula revisa su estado fisiológico con relación a un proceso concreto y genera señales en respuesta a posibles errores, que pararían o enlentecerían el ciclo celular, para subsanarlos. A modo de ejemplo, la existencia de un cromosoma sin anclar en el huso mitótico desencadena una señal que retrasa el principio de la segregación anafásica para permitir dicho anclaje. En este caso, la parada o el retraso en el desarrollo del ciclo se producen como consecuencia de la acción reguladora del punto de comprobación y no por imposibilidad física de la célula para proseguir; la presencia de un cromosoma sin anclar en el huso no representa ninguna imposibilidad física para que los otros cromosomas inicien su segregación.

Hay agentes que engañan a la célula al bloquear los mecanismos de señalización sitos en los puntos de comprobación. Imaginemos que no ha comenzado el proceso de replicación del ADN; el punto de comprobación le advierte a la célula que no debe entrar en mitosis, que es un proceso posterior. Pero si bloqueamos los mecanismos de acción de ese punto de contrastación, y se da paso a las señales que indican a la célula que está lista para la mitosis, el núcleo en G_1 iniciará con rapidez una mitosis aberrante; podemos provocar ese fenómeno al fusionar la célula de partida con otra célula mitótica donde estas señales no estén alteradas.

Varios son los mecanismos de comprobación que concurren en el período G_2 del ciclo celular. Los puntos de contrastación situados en G_2 han de asegurar la ejecución de dos procesos: terminación de la fase de replicación previa y correcta preparación para la mitosis subsiguiente.

Ambas, la presencia de ADN sin replicar y la lesión del ADN, pueden impedir o retrasar la entrada en mitosis. Antes de entrar en división, la célula debe asegurarse de que todo su ADN esté replicado; de lo contrario, ocurriría que, tras la división celular, las células hijas se hallarían con una mengua en su material genético que provocaría la muerte, la disminución en su viabilidad o alteraciones en la regulación de su ciclo celular con resultado de cáncer. Por las mismas razones, la presencia de daño no reparado en el ADN se convierte en algo deletéreo para la célula.

Se desconocen los mecanismos sensores, de transducción y amplificación de señales, así como los mecanismos de la traducción de señales en una respuesta relacionada con el desarrollo del ciclo celular, que subyacen en los dos puntos de comprobación mencionados. Con todo, hay datos que parecen respaldar la idea según la cual algunas partes del proceso al menos serían comunes; y así, podrían existir sistemas generales de traducción de señales que estuvieran conectados a sistemas sensores específicos, logrando que la célula responda de una forma similar frente a situaciones diferentes. Algunos de estos datos proceden de la cafeína; ésta posibilita, en múltiples tipos celulares, que la célula pase por alto ambos puntos de contrastación. Lo mismo acontece con una cascada de quinasas y fosfatasas implicada en la traducción de señales en la que algunos elementos son comunes.

El último punto de comprobación en G_2 identificado hasta el momento se encuentra relacionado con la actividad de la topoisomerasa II. Desde hace tiempo se sabía que el bloqueo de la actividad de esta proteína provocaba una parada en G_2 que se atribuía al daño que estos agentes bloqueantes inducían en el ADN. La disponibilidad de drogas inhibidoras de la actividad topo II que no producen daño en el ADN ha permitido relacionar esta parada en G_2 con un genuino punto de comprobación, que lo anula también la cafeína y tiene que ver con la actividad disgregadora de la cadena por parte de la enzima.

El descubrimiento de este punto de chequeo ofrecía sugerentes perspectivas en lo que a estructura cromosómica se refiere, dado que a la enzima topo II se le atribuye un importante papel en la organización del eje cromosómico ("scaffold"). En tanto que el eje cromosómico ocupa una posición central en cada cromátida del cromosoma metafásico, esta posición es lateral cuando se impide la acción de topo II durante el proceso de condensación cromosómica; y así, aparecen ambos ejes cromatídicos hermanos asociados en único eje.

JUAN FRANCISCO GIMÉNEZ-ABIÁN
Y D. J. CLARKE
Centro de Investigaciones
Biológicas. Madrid

Fotos: Xavier Ferrer y Adolfo de Sostoa
Texto: Xavier Ferrer

Hormigas arrieras

La selva nos ofrece estampas de una belleza insospechada. Basta con tener los sentidos despiertos para apreciarla. Los sentidos despiertos y... el pie levantado. Las columnas de hormigas arrieras carretean trozos de hojas o flores. Las hormigas arrieras, o cortadoras de hojas, forman un conjunto de 39 especies pertenecientes a dos géneros, *Acromyrmex* y *Atta*, que viven sólo en el Nuevo Mundo entre los 33° N y los 44° S. Los nidos más llamativos son los de *Atta*, que se extienden sobre 250 m^2 o más, alcanzan varios metros de profundidad, albergan a varios millones de ejemplares y tienen hasta 10 caminos de acceso para las obreras.

Las hormigas arrieras se alimentan de un hongo (*Attamyces bromatificus*) que cultivan en sus cámaras. Para ello aportan materia orgánica en forma de hojas y flores que las obreras cortan y transportan hasta el nido. Estas hormigas tienen una casta de obreras más pequeñas que cabalga sobre los trozos de hojas transportados por las mayores, para evitar que, en el trayecto hasta el nido, dípteros u otros parásitos depositen su puesta o larva en la hoja. Quizá no sepa el lector de la eficacia herbívora de las arrieras: se las considera responsables del consumo de un 15 a un 17 por ciento de la producción de hojas, mientras que el resto de animales herbívoros de las selvas, en conjunto sólo llegan a explotar el 7 por ciento de esta producción.

En la selva lluviosa de Cuyabeno (Ecuador) conseguimos estas imágenes con trípode, teleobjetivo de 100 macro y dos flashes.







Los nuevos virus

Cada año se identifican nuevos virus. Entre los más peligrosos para el hombre figuran los de las fiebres hemorrágicas. Las alteraciones naturales o artificiales del ambiente favorecen su propagación

Bernard Le Guenno

En mayo de 1993, los dos miembros de una joven pareja murieron con algunos días de diferencia en Nuevo México, aquejados de insuficiencia respiratoria aguda. La enfermedad se manifestó por un acceso de fiebre, dolores musculares, dolores de cabeza y tos violenta. A raíz de este hecho, se investigó si habían ocurrido casos equivalentes en otro lugar. De acuerdo con los resultados, se descubrieron 24, ocurridos entre el 1 de diciembre de 1992 y el 7 de junio de 1993, en los estados de Nuevo México, Colorado y Nevada. Once de esos pacientes han muerto.

Los análisis bacteriológicos, parasitológicos y virológicos practicados en los hospitales universitarios de los estados de la Unión concernidos fueron todos negativos. Las muestras se enviaron entonces al Centro de Control y Prevención de las Enfermedades, CDC, de Atlanta, donde se realizaron todas las pruebas de detección de los virus conocidos. Se acabó por descubrir, en el suero de varios pacientes, anticuerpos contra hantavirus. La utilización de las técnicas de biología molecular revela que los pacientes fueron infectados por un virus del género hantavirus, desconocido hasta entonces. Más recientemente, la revista *Times*, en su número del 5 de septiembre de 1994, anunciaba que un científico se había infectado manipulando el virus *Sabia*, aislado en 1990 en Brasil en un paciente muerto de fiebre hemorrágica.

Virus nuevos, patologías a veces fulminantes. Las técnicas de análisis de las que disponen los biólogos, cada vez más eficaces, permiten identificar agentes infecciosos, sobre todo virus, que tan sólo hace diez años habrían pasado inadvertidos o confundidos con virus próximos conocidos.

Se descubren regularmente nuevas cepas de virus responsables de las fiebres hemorrágicas, como la que acabamos de poner de manifiesto, en Africa. Estos "nuevos" virus no son siempre letales para el hombre. Todos son responsables de la fiebre, pero las hemorragias que desencadenan y las lesiones hísticas son más o menos graves. Las cepas de Francia y el noroeste europeo, por ejemplo, no son mortales. A menudo, dos cepas de un mismo género no tienen la misma virulencia, ni pareja tasa de mortalidad.

Pese a su denominación, estos virus no son "nuevos": ningún virus puede aparecer de repente; todo lo más, la producción de mutaciones o de recombinaciones entre virus existentes engendra cepas más virulentas. Los nuevos virus se manifiestan fundamentalmente porque se modifican las condiciones en que existían desde hacía años. En ciertos casos, su ambiente cambia, permitiéndoles multiplicarse y propagarse, induciendo la aparición de patologías desconocidas. Cuando se reúnen las condiciones favorables para los virus y sus vectores, aparecen nuevas enfermedades.

Los virus de las fiebres hemorrágicas

La pandemia debida al virus de inmunodeficiencia humana, responsable del sida, ha revelado la gran amenaza de las "enfermedades emergentes". Este concepto se formalizó en 1989, en Estados Unidos. Hoy, varios grupos se aprestan a coordinar sus estudios epidemiológicos y fundar una red internacional de vigilancia para seguir la pista a todos los agentes infecciosos: virus, bacterias, parásitos y hongos nuevos, y a los que reaparecen, como los agentes infecciosos responsables de la tuberculosis, la peste o el cólera. La red de alerta constituida por los Centros de la Organización Mundial de la Salud para los arbovirus y los virus de las fiebres hemorrágicas se halla en permanente alerta; entre los nuevos agentes, los virus de las fiebres hemorrágicas ocupan un lugar preeminente.

Cuando estos virus infectan al hombre, causan las enfermedades agrupadas bajo la expresión de "fiebres hemorrágicas": los pacientes tienen siempre fiebre, pero no sistemáticamente hemorragias. Al período febril le sigue una degradación del estado general, durante el cual se producen las pérdidas de sangre. Las hemorragias superficiales se manifiestan por signos cutáneos, como petequias (pequeños vasos que revientan debajo de la piel), equimosis o púrpura (manchas cutáneas de un rojo oscuro). Pueden sobrevenir otras complicaciones cardiovasculares, digestivas, neurológicas o renales. En los casos más graves, el enfermo muere de hemorragias internas o de insuficiencia multivisceral.

Estos virus pertenecen a varias familias, de las cuales los Flaviviridae se conocen hace tiempo; comprenden sobre todo los virus *Amaril*, transmitidos por mosquitos y responsables de la fiebre amarilla, y otros virus que provocan fiebres hemorrágicas y son transmitidos también por artrópodos, mosquitos y garrapatas. Pese a la existencia de una vacuna eficaz, la fiebre amarilla sigue causando estragos en Africa y el dengue hemorrágico se extiende en la zona tropical, a partir del foco del sudeste asiático.

Los nuevos virus aparecidos en el curso de los últimos cinco años pertenecen a otras tres familias: los Arenaviridae, los Bunyaviridae y los Filoviridae. Entre estos nuevos virus destacan el *Sabia*, el *Guanarito* y el *Reston*, que deben su nombre al lugar donde se manifestaron por primera vez; el último recién nacido ha sido bautizado *Sin nombre* y el pos-

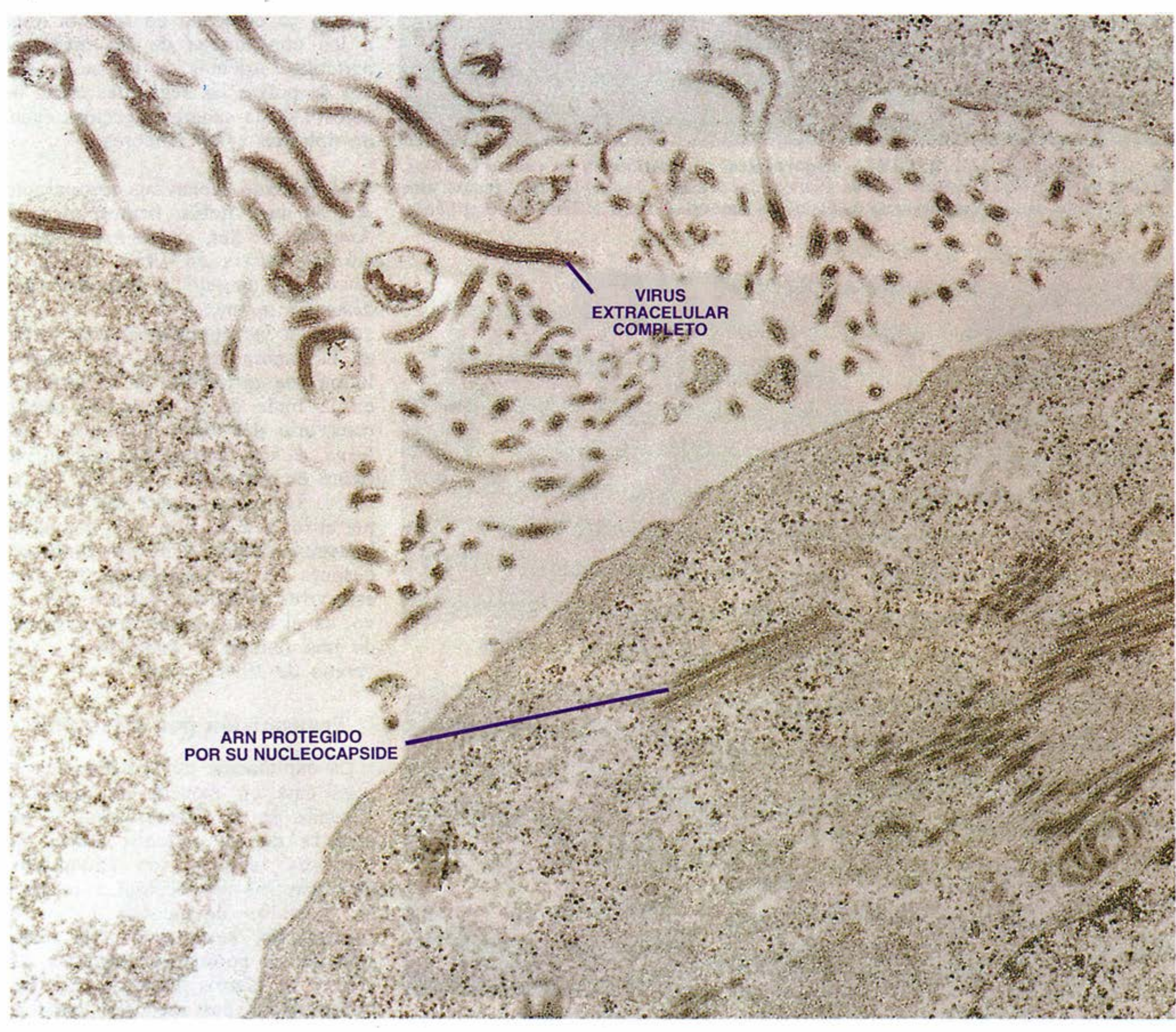
BERNARD LE GUENNO dirige el Centro Nacional de Referencia de Fiebres Hemorrágicas Víricas del Instituto Pasteur.

trer virus que acabamos de descubrir pertenece a una familia configurada hace poco, la familia de los Filoviridae. En enero de 1995 aislamos una cepa del virus *Ebola*, desconocida hasta entonces, en una paciente que se había contaminado manipulando muestras de chimpancés salvajes de la Costa de Marfil, diezmados por una extraña epidemia. Estos chimpancés sucumben al virus, lo que significa que no son su reservorio natural, todavía por determinar. Los nuevos virus pertenecen a diferentes familias, pero los signos clínicos que producen, las causas de su aparición, su constitución y su modo de acción presentan puntos comunes.

Todos los Arenaviridae y los Bunyaviridae responsables de las fiebres hemorrágicas circulan de forma natural entre las diversas poblaciones animales, pero no siempre infectan al ser humano. Se ignora el mecanismo de transmisión de los Filoviridae. No suelen pasar de una persona contagiada a una sana, sino que las epidemias están ligadas a la presencia de vectores y de reservorios del virus. Diversas especies de roedores son excelentes reservorios de estos virus, porque no manifiestan síntoma alguno cuando son infectados. Pese a la presencia de anticuerpos en su suero, eliminan durante toda su vida partículas víricas en sus excretas (los excrementos y, sobre todo, la orina).

Los agentes de la contaminación

¿Cómo se contagia el ser humano? Para que el contagio tenga lugar, es preciso que se perturbe el ciclo biológico de estos virus. Para descubrirlos, es necesario que los médicos y los biólogos puedan identificar la enfermedad y el agente causal. La primera causa de contaminación suele ser una perturbación ecológica ligada a las actividades humanas. La expansión de la población mundial perturba los ecosistemas naturales estables y facilita los contactos entre los animales portadores de virus patógenos y el ser humano. Este fue el caso, por ejemplo, del arenavirus *Guanarito*, descubierto en 1989 durante una epidemia en Venezuela. Los 15 primeros casos pertenecían a la misma comunidad rural que había emprendido el clareo de una zona forestal en el centro del país. Desde entonces, se han diagnosticado más de 100 casos en la misma región. El reservorio es un roedor, *Sigmodon alstoni*. Cuando los campesinos emprendieron



1. VIRUS EBOLA (filamentos a menudo agrupados en paralelo y aquí aumentados 30.000 veces) descubierto en enero de 1995 por el autor y su equipo. Pertenece a la familia de los Filoviridae, o virus filamentosos, los más largos que se conocen. A menudo mortal para el ser humano y el mono, el *Ebola* desencadena fuertes fiebres y hemorragias internas.

el clareo del bosque, levantaron polvo infectado por la orina o los excrementos secos. El contagio tuvo lugar por vía respiratoria. Se trata de uno de los modos de transmisión más frecuentes de estos virus.

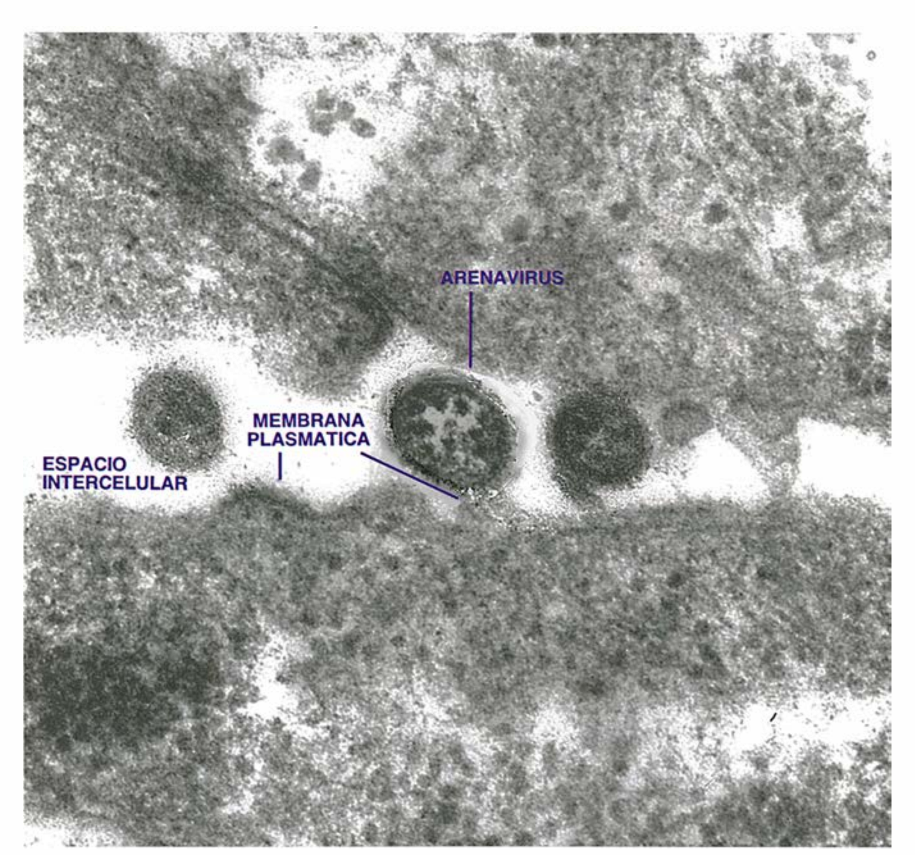
Otro arenavirus, el *Sabia*, sólo tiene en su haber una víctima por infección natural, una mujer ingeniero agrícola del estado de São Paulo, pero no se ha identificado todavía con precisión el lugar donde se produjo el contagio. Existe el riesgo de aparición de un brote epidémico si las actividades agrícolas inducen el contacto de los habitantes del estado de São Paulo con los roedores vectores. Es probable la existencia de otros casos que no se hayan diagnosticado.

FAMILIA	GENERO	VIRUS	ENFERMEDAD
FLAVIRIDAE	FLAVIVIRUS	*AMARIL* *DENGUE 1, 2, 3, 4* *GRUPO TBE*	FIEBRE AMARILLA DENGUE FIEBRES HEMORRAGICAS DE OMSK Y DE KYASANUR
BUNYVIRIDAE	FLEBOVIRUS NAIROVIRUS HANTAVIRUS	*RIFT* *CONGO-CRIMEA* *HANTAAN* *SEUL* *PUUMALA* *SIN NOMBRE*	FIEBRE DEL VALLE DEL RIFT FIEBRE HEMORRAGICA DE CONGO-CRIMEA FIEBRE HEMORRAGICA CON SINDROME RENAL
ARENAVIRIDAE	ARENAVIRUS	*LASSA* *JUNIN* *MACHUPO* *GUANARITO* *SABIA*	FIEBRE HEMORRAGICA DE LASSA FIEBRE HEMORRAGICA DE ARGENTINA FIEBRE HEMORRAGICA DE BOLIVIA FIEBRE HEMORRAGICA DE VENEZUELA FIEBRE HEMORRAGICA DE BRASIL
FILOVIRIDAE	FILOVIRUS	*MARBURG* *EBOLA Z, S, R, C1*	EFERMEDAD DE MARBURG ENFERMEDAD POR EL VIRUS EBOLA

2. LOS VIRUS DE LAS FIEBRES hemorrágicas se distribuyen en cuatro familias. Recientemente se han aislado nuevos virus de las familias Bunyaviridae, Arenaviridae y Filoviridae. Muere una persona de cada dos contagiadas por el *Marburg* o el *Ebola*.

Desde hace tiempo se conocen otros arenavirus responsables de fiebres hemorrágicas, por ejemplo, el virus *Junin*, identificado en 1958. La enfermedad de la que es responsable, la fiebre hemorrágica de Argentina, apareció a finales de los años cuarenta en la región de la pampa, al este de Buenos Aires. El cultivo de grandes superficies de maíz favoreció la multiplicación de los roedores que sirven de reservorio de este virus, *Callomys musculinus* y *Callomys laucha*, en detrimento de otros roedores, y ha multiplicado los contactos entre aquéllos y los campesinos. Casi todos los casos eran varones adultos, contagiados porque habían inhalado el polvo contaminado por las excretas de los roedores cuando cortaban a mano las mazorcas de maíz. Hoy, la mecanización ha colocado en primera línea a los conductores de las máquinas agrícolas. Además de las suspensiones de polvo, las segadoras crean un aerosol de la sangre infecciosa cuando aplastan a los roedores.

El segundo arenavirus responsable de una fiebre hemorrágica en América del Sur, el *Machupo*, apareció en Bolivia en 1952, cuando la revolución empujó al este del país, hasta los márgenes de la selva amazónica, a las poblaciones que vivían en la llanura del Beni; allí desarrollaron una agricultura de subsistencia en la linde de la selva. El roedor reservorio del virus, *Callomyus callosus*, es más antropófilo que su pariente de Argentina y penetra en las casas. La lucha contra los roedores permitió acabar con los contagios humanos desde 1974. Sin embargo, después de un silencio de 20 años, este virus se ha manifestado de nuevo, en el mismo sitio: siete personas de una familia lo contrajeron en el verano de 1994.



3. LOS ARENAVIRIDAE son esféricos. Se ven aquí tres partículas víricas que han salido de la célula inferior. Al abandonar la célula, las partículas víricas arrastran con ellas una parte de la membrana celular. Además, se llevan diversos ribosomas (*los puntos negros*) de la célula; este aspecto granuloso les ha valido su nombre.

Transmisión por mosquitos

La explotación de la naturaleza se paga cara en moneda de contagio. Además de la deforestación y los cultivos de los terrenos donde los roedores vectores son endémicos, otra perturbación ecológica provoca la aparición de nuevos virus: la construcción de embalses y la extensión de los perímetros irrigados. En efecto, si ciertos Bunyaviridae son transportados por roedores, otros lo son por mosquitos. La construcción de embalses favorece la pululación de mosquitos y crea concentraciones

humanas y de animales. A la conjunción de estos dos factores se atribuye el origen de dos epidemias de fiebre del valle del Rift ocurridas en Africa: una en 1977 en Egipto y otra en 1987 en Mauritania.

El flebovirus responsable se ha venido aislando desde 1931: transmitido por los mosquitos, ha sido el causante de una epizootia entre los pequeños rumiantes. Más tarde, este virus de la fiebre del valle del Rift originó varias epizootias en los ovinos, al este y al sur de Africa. La mayoría de las personas infectadas eran ganaderos en contacto con animales enfermos o muertos, pero la infección fue menor. La situación cambió de forma brusca después de 1970: se han notificado varias muertes. A raíz de la construcción de la presa de Asuán, las pérdidas de ganado han sido notables, se han infectado 200.000 personas y muerto 600. Las autoridades sanitarias tomaron conciencia entonces del riesgo de epidemia de fiebre hemorrágica causada por el virus de la fiebre del valle del Rift y transmitida por los mosquitos. De igual modo, en 1987 se produjo una epidemia al poco de construirse la presa de Diama, en Mauritania: causó 224 víctimas.

Antes de estas epidemias, los virus estarían presentes en los huevos de diversos mosquitos (sobre todo *Aedes*). Las hembras transmiten, por vía transovárica, el virus a sus huevos, que resisten la desecación de las marismas. Cuando las lluvias son débiles, el número de vectores es limitado. Por el contrario, cuando se eleva la pluviosidad, o durante los trabajos de irrigación, los mosquitos pululan, transmiten el virus al ganado y al hombre, que se contagia igualmente por contacto directo con el ganado.



4. LOS ROEDORES son a menudo los reservorios de los virus de las fiebres hemorrágicas. Transportan los virus sin enfermar. El hombre entra en contacto con animales contaminados durante operaciones de deforestación (*a*), en períodos de humedad no habitual, durante los cuales ciertos roedores que se alimentan de piñones empiezan a proliferar (*b*), durante los trabajos agrícolas (*c*) o de restauración de casas abandonadas (*d*). Mientras trabajan, los hombres levantan polvo infectado con orina o excrementos que contienen virus. El contagio tiene lugar por vía respiratoria.

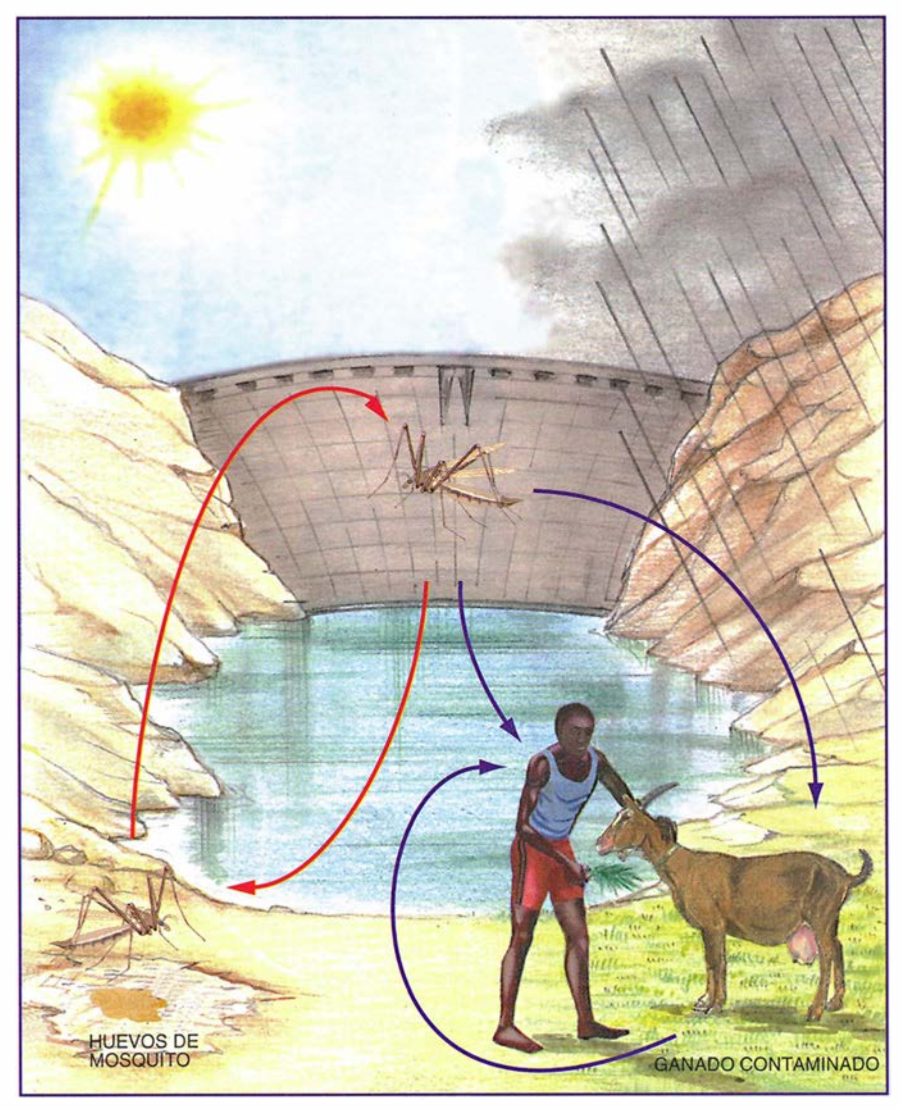
El ser humano no es siempre la causa de las modificaciones del ambiente. La aparición del hantavirus *Sin nombre* en Estados Unidos, en 1993, se debió a la caída copiosa de lluvia y de nieve en la primavera de ese año en la región montañosa y desértica de los estados de Nuevo México, Nevada y Colorado. El reservorio de *Sin nombre* es el ratón *Peromyscus maniculatus*, que se alimenta de piñones: la excepcional humedad ha favorecido una producción abundante de piñones y la proliferación del reservorio del virus *Sin nombre*. La densidad de estos animales se ha decuplicado entre 1992 y 1993, multiplicando los riesgos de contacto entre los animales vectores y el ser humano. Dieciséis casos se identificaron en el mes de mayo de 1993, que permitieron el reconocimiento de la enfermedad y su agente causal.

Pero las perturbaciones ecológicas no son tampoco las únicas responsables de la aparición de nuevos virus. El desarrollo de la industria biológica comporta riesgos: al preparar las vacunas a partir de células animales contaminadas se puede transmitir un virus no identificado a las personas vacunadas. Ocurrió con un cultivo de células de riñón de mono contaminado, que permitió el descubrimiento de una nueva fiebre hemorrágica y de una nueva familia de virus, los Filoviridae.

Las contaminaciones accidentales

Los Filoviridae son los virus más largos que se conocen: de estructura filiforme, miden unos 1500 nanómetros (una partícula vírica esférica, por ejemplo de arenavirus, tiene un diámetro de 300 nanómetros). En 1967, enfermaron en Marburgo 25 personas que preparaban cultivos celulares a partir de riñones de un mono *Cercopithecus aethiops*; siete de ellas fallecieron. Se notificó a la vez otro caso en Frankfurt y otro en Yugoslavia, en laboratorios donde se habían recibido monos procedentes de Uganda. Los monos murieron igualmente de la enfermedad, pero las investigaciones llevadas a cabo en el este africano no han permitido descubrir el reservorio del virus. En Sudáfrica, Zimbabwe y Kenia se han notificado cuatro casos de infección natural. Aunque se desconoce la vía de contagio, se han indicado contaminaciones secundarias entre el personal hospitalario.

Existe riesgo de infección en el medio hospitalario, sin que se conozcan siempre las modalidades de transmisión. Se sabe de dos virus de las fiebres hemorrágicas que han intervenido en epidemias hospitalarias: el de Lassa y el *Ebola*. En enero de 1969, en Lassa (Nigeria), una religiosa celadora cayó enferma en el hospital donde trabajaba. Evacuada a



5. LOS INSECTOS son un vehículo potencial de los virus de la fiebre hemorrágica del Rift. Las hembras de los mosquitos *Aedes* transmiten el virus que llevan en sus huevos. En caso de sequía *(izquierda)*, los mosquitos se multiplican poco. Por el contrario, en caso de lluvias abundantes (*derecha*) o de construcción de embalses, los mosquitos pululan; infectan directamente al hombre o al ganado, que abunda cerca de los embalses; este último transmite los virus a los ganaderos.

la ciudad vecina de Jos, contagió antes de fallecer a otras dos religiosas, una de las cuales murió. Un año después se declaró una epidemia en ese mismo hospital. Una investigación retrospectiva demostró que 17 de las 25 personas contagiadas lo habían sido probablemente en la sala donde había estado hospitalizada la primera enferma. En 1976, se declararon otras dos epidemias de fiebre debidas a otro virus con una diferencia de dos meses, al sur del Sudán y al norte de Zaire. El hospital ha desempeñado el papel de amplificador en estas tres epidemias.

En Zaire, se registraron, en torno al hospital de Yambuku, al borde del río Ebola, 318 casos y 280 personas murieron. Ochenta y cinco de ellas habían recibido una inyección en dicho centro. Se sabe hoy que el primer caso fue un maestro hospitalizado que se suponía afectado de paludismo: recibió, por tanto, una inyección de quinina. Como el hospital sólo disponía de cinco jeringas y, puesto que no se esterilizaban de un paciente a otro, la epidemia se propagó. Ello ha permitido la identificación del nuevo virus, denominado *Ebola*.

El virus *Marburg* y el virus *Ebola*, reagrupados en la familia de los Filoviridae, comparten idéntica peligrosidad y son de origen desconocido. Aunque *Marburg* sólo ha infectado a algunas personas, *Ebola* ha sido, en mayo de este año, el causante de una nueva epidemia en Zaire. En 1989, los especialistas de estos virus del CDC se aterraron al observar que los monos procedentes de las Filipinas, e instalados en un estabulario de cuarentena en Reston (Virginia), morían infectados por un filovirus *Ebola*. El virus se aisló también en otros estabularios que habían recibido monos del mismo origen. No se registró, sin embargo, enfermo humano alguno después de esta epidemia en el mono, lo que confirma que no todas las cepas próximas revisten igual peligro.

La mejora de los instrumentos diagnósticos

El desarrollo de las herramientas virológicas es otra causa de aparición de nuevos virus. En un comienzo, se creyó que el enfermo infectado por el arenavirus *Sabia* padecía fiebre amarilla. Sólo se identificó el agente responsable al enviar la muestra a un laboratorio equipado para el aislamiento de virus. Se trata de un hecho excepcional, pues la mayoría de los virus aquí mencionados circulan en zonas tropicales, cuyos hospitales suelen carecer de los medios de diagnóstico apropiados y numerosas personas contagiadas no acuden a los centros sanitarios.

La identificación rápida del *Sin nombre* ha sido posible gracias a los resultados acumulados durante varios años en el dominio de los hantavirus. Desde 1983 se denomina enfermedad hemorrágica con síndrome renal a la enfermedad producida por los hantavirus: ya estaba descrita en un tratado de medicina china de una antigüedad de 1000 años. Los occidentales se interesaron por esta enfermedad durante la guerra de Corea, cuando más de 2000 soldados de las Naciones Unidas la padecieron entre 1951 y 1953, con una letalidad que alcanzó el diez por ciento. Pese a los esfuerzos de los virólogos, el agente no se identificó hasta 1976 en los pulmones de su principal reservorio en Corea, el ratón de campo *Apodemus agrarius*. Fueron necesarios aún otros cuatro años para aislar el virus, adaptarlo a un cultivo celular (etapa indispensable para el estudio de un virus) y preparar los reactivos que permitieran un diagnóstico serológico; su nombre, *Hantaan*, le viene del río que separa Corea del norte de Corea del sur. Este virus circula de Japón a Rusia; en los Balcanes existe otro virus muy próximo y de similar agresividad.

En Europa se da una forma más benigna de esta enfermedad. Se describió en Suecia, en 1934, como nefritis epidémica, pero el agente causante no se identificó hasta 1980; se observó en los pulmones de un roedor,

el campañol rojizo, *Clethrionomys glareolus*. Aislado en 1983, en Finlandia, el virus recibió el nombre de un lago de ese país, *Puumala.*

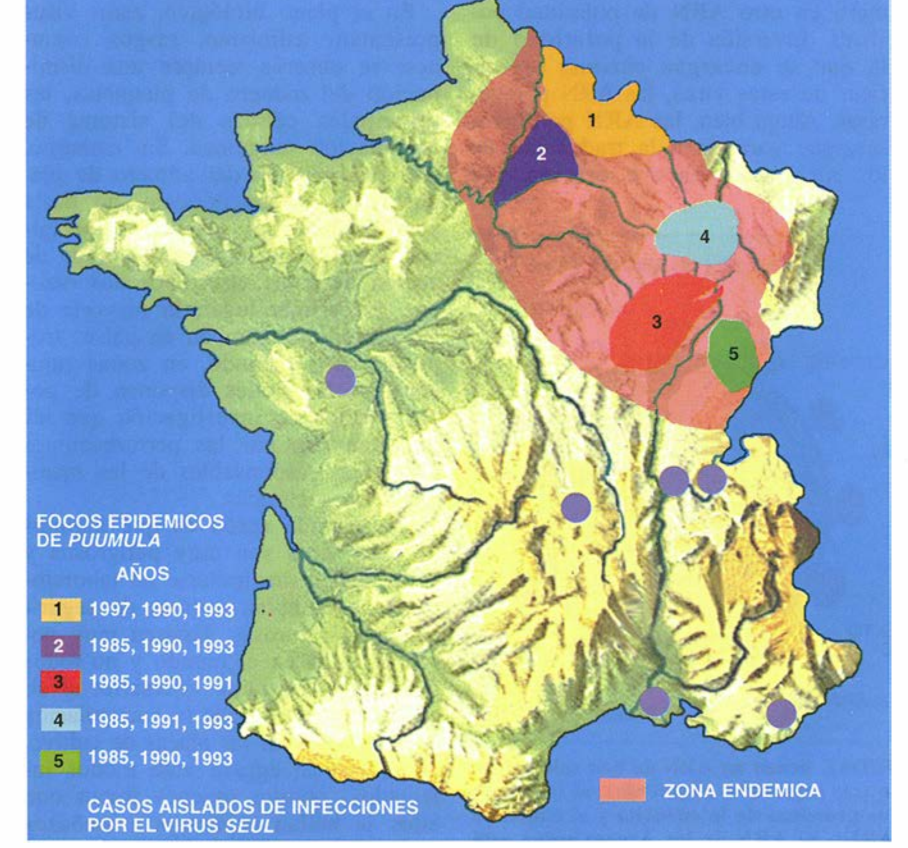
Así pues, hace apenas algo más de diez años que disponemos de los reactivos necesarios para la identificación de estas enfermedades. Gracias a tales reactivos y a una técnica de investigación de los anticuerpos precoces, que son los marcadores de una enfermedad reciente, los científicos del CDC se han puesto rápidamente sobre la pista de los hantavirus. Sin embargo, la presencia de anticuerpos específicos jamás es una prueba absoluta de infección por el agente patógeno correspondiente: pueden existir reacciones falso positivas sin relación con el agente, así como reacciones cruzadas debidas a la presencia de fragmentos de antígenos comunes a diversos virus de un mismo grupo. Una técnica más reciente, basada en la multiplicación (amplificación) génica, que hace posible secuenciar fragmentos de los genes después de haberlos reiterado, ha permitido confirmar que los enfermos americanos estaban infectados por hantavirus: la identificación del nuevo virus *Sin nombre* ha tardado sólo ocho días.

Los hantavirus en Francia

Francia sufrió, en 1993, la epidemia más aguda de fiebre hemorrágica con síndrome renal: se contaron 192 casos. ¿Se trataba de una nueva enfermedad? Durante la Primera Guerra Mundial, los casos de "nefritis azoémica pura" notificados por el médico militar Ameuille eran, probablemente, casos de fiebre hemorrágica con síndrome renal. El virus se identificó en Francia, utilizando técnicas biológicas, en 1982. Desde 1977 hasta nuestros días, se han identificado 513 casos de fiebre hemorrágica con síndrome renal. Sin la menor duda, tres pacientes habían contraído la infección fuera: Finlandia, Yugoslavia y Rusia. Entre los 510 casos autóctonos, 505 infecciones por el virus *Puumala* habían tenido lugar en el cuadrante nordoriental del país; cinco se debían a un virus más próximo al *Hantaan* que al *Puumala:* probablemente, el virus *Seul*, un hantavirus cosmopolita y transmitido por las ratas. Estos casos se distribuyen por brotes epidémicos, detectándose en general el número máximo en mayo, con un segundo pico, quizás, en invierno.

Se observó que, en el curso de esas epidemias, los lugares de contaminación se repartían en cinco focos principales. El macizo boscoso de las Ardenas, donde se diagnosticaron los primeros casos en 1977; un triángulo comprendido entre los valles del Oise y del Marne, uno de cuyos vértices estaba representado por París y la base por una línea que conecta Saint-Quentin con Reims, donde el primer caso diagnosticado serológicamente data de 1982; el Franco-Condado, con un foco principal situado a caballo entre el Doubs y el Jura; la Lorena, con un foco circunscrito a los alrededores de Nancy; un dominio que engloba la Costa de Oro y el Marne, donde los casos son más dispersos. No todas las zonas se infectaron por igual en el curso de diferentes epidemias, pero su superficie no se ha extendido de una epidemia a la siguiente. Incluso cuando no hay epidemia, se registran cada año algunos casos en la región situada entre el Oise y el Marne, donde se han producido más del 15 por ciento de los casos en cada brote epidémico. En las otras regiones, los episodios presentan una periodicidad aparente de dos a tres años.

Los reservorios de *Puumala* en Europa, el campañol rosado (*Clethrionomys glareolus*) y el ratón de campo de cuello amarillo (*Apodemus flavicollis*), amén de sedentarios, son animales silvestres que viven sólo de 12 a 18 meses. Su débil radio de acción alrededor de su territorio (entre 20 y 50 metros) explica que los focos epidémicos estén localizados. Viven en el bosque frondoso, sobre todo de hayas y robles. Sin embargo, ciertas contaminaciones tienen lugar en granjas, almacenes o casas deshabitadas, lo que acusa a los roedores más antropófilos, como el ratón gris de campo (*Apodemus sylvaticus*), que no



6. FRANCIA ha sido el foco de varias epidemias de fiebres hemorrágicas con síndrome renal (*izquierda*). Se deben sobre todo a *Puumala*, un hantavirus. Aunque ciertos primos de *Puumala* son mortales, el que reina en el noroeste de Europa es más benigno. El reservorio de *Puumala* es el campañol rosado (*derecha*), habitante de los bosques frondosos; se desplaza poco, razón por la cual las epidemias permanecen bastante circunscritas. La zona 1 ha sido la más afectada, con 195 casos.

duda en penetrar en los locales. El modo de contagio más frecuente es, como en los casos que se acaban de mencionar, la inhalación de polvo contaminado durante la manipulación de leña recogida del bosque o de los montones apilados en la proximidad de las casas, o durante la realización de trabajos en cobertizos, granjas, silos o casas viejas. Estas actividades determinan que los varones se vean afectados con más frecuencia que las mujeres. En la primera descripción de la enfermedad que se hizo en Francia, se identificaba como "nefritis del leñador". La proporción viene a ser de seis varones contagiados por cada mujer, y la mayoría de las personas infectadas tiene entre 20 y 50 años. Alrededor del 70 por ciento de los pacientes vive en el campo y el 28 por ciento realiza una actividad agrícola. Los niños suelen quedar excluidos.

Aunque el aumento regular del número de casos en cada epidemia podría evocar una enfermedad emergente, quizá no refleja la situación real: en la zona endémica, los médicos han pedido más exámenes biológicos, y el número de enfermedades diagnosticadas ha aumentado notablemente desde 1990. Además, a partir de 1989 se ha refinado la sensibilidad de las pruebas: se ha aislado ya una cepa autóctona de un enfermo. Los avances en los métodos de detección no impidieron la agresividad de la epidemia de 1992-1993, que lo fue también en las naciones vecinas de Bélgica, Alemania y los Países Bajos. Ello coincidió con un desmesurado crecimiento demográfico de todas las especies de roedores, el más importante desde 1939. Habría sido una de las consecuencias de un invierno clemente y de la abundancia de alimento.

Los hantavirus del noroeste europeo no se han cobrado víctimas, a diferencia de los hantavirus americanos o asiáticos. Al ser distinto el reservorio-vector, no hay riesgo de que haya aparecido en Francia la cepa americana.

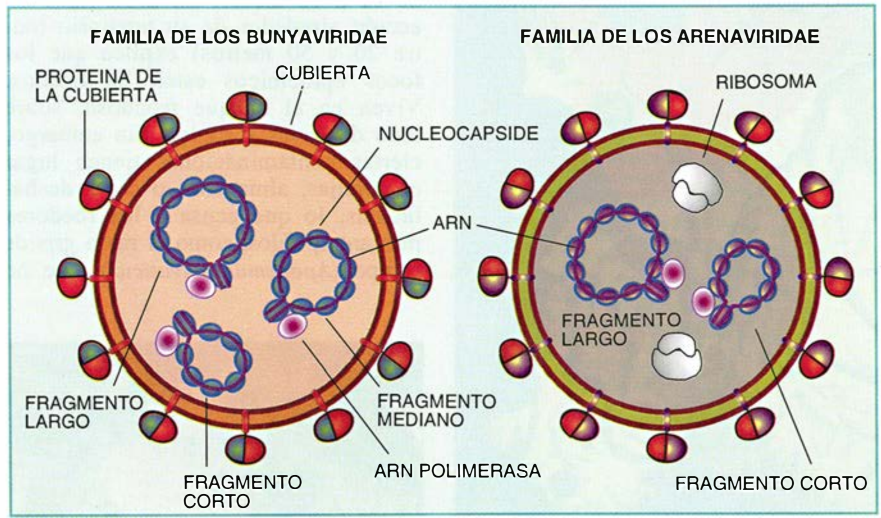
Constitución y mecanismos de acción

Los Bunyaviridae, los Arenaviridae y los Filoviridae son todos virus ARN monocatenarios negativos: el mensaje contenido en su genoma está constituido por ribonucleótidos, en tanto que el genoma de los seres vivos lo forma ADN, una concatenación de desoxirribonucleótidos. El ADN se transcribe primero en ARN mensajero (ARN positivo), antes de traducirse en proteínas. En los virus de ARN, éste o es positivo, como ocurre en el de la poliomielitis, y se traduce directamente en proteínas víricas por la maquinaria celular, o bien el ARN es negativo, y debe trascribirse primero en otro ARN de polaridad positiva. Inversión de la polaridad de la que se encargan enzimas específicas de estos virus, las ARN polimerasas. Ahora bien, las ARN polimerasas, que garantizan la traducción de los ARN, cometen más errores que las ADN polimerasas; y puesto que estos errores no se corrigen, una célula infectada da origen a una población heterogénea de virus. La existencia de estas "cuasiespecies" explica la rápida adaptación de los virus a los cambios ambientales: algunos se adaptan a los huéspedes invertebrados, otros a los vertebrados, y desbaratan el sistema inmunitario de su huésped; por último, pueden aparecer variantes patógenas.

Otra característica conocida de los Arenaviridae y los Bunyaviridae se refiere a la segmentación de su genoma. Los Bunyaviridae tienen tres segmentos de ARN protegidos por una nucleocápside: el más corto cifra la nucleocápside, el mediano las proteínas de la cubierta y el más largo la ARN polimerasa. Los Arenaviridae constan de dos segmentos de ARN: el más corto cifra la nucleocápside cuando se lee en un sentido y las proteínas de la cubierta cuando se lee en el opuesto; el segmento largo cifra la ARN polimerasa. Cuando una misma célula se infecta por dos virus del mismo género, éstos pueden combinarse, asociándose los segmentos de uno con los de otro para originar nuevas cepas, las recombinantes.

En el plano biológico, estos virus presentan, asimismo, rasgos comunes: se observa siempre una disminución del número de plaquetas, las principales células del sistema de coagulación sanguínea. Sin embargo, esta disminución del número de plaquetas, o trombocitopenia, no basta para explicar los signos hemorrágicos. Aún conocemos mal el modo de acción de estos virus, por dos razones. En primer lugar, la mayoría de los episodios irrumpen en países tropicales y, a menudo, en zonas rurales. Los hospitales disponen de pocos medios de investigación que les permitan explorar las perturbaciones biológicas responsables de las manifestaciones clínicas.

La segunda razón es que algunos de esos virus son muy peligrosos y sólo pueden manipularse en laboratorios que cumplan normas de seguridad muy rigurosas. Existen muy pocos de ellos en el mundo y no todos disponen del equipo necesario: si no acarrea graves riesgos la manipulación de tales virus en las placas de cultivo, el peligro se agrava ante monos infectados, porque quienes tratan con ellos se hallan expuestos a arañazos y mordeduras de animales enfermos, y, por ende, al contagio. Finalmente, esos virus, a veces mortales para el hombre, no pueden estudiarse en los



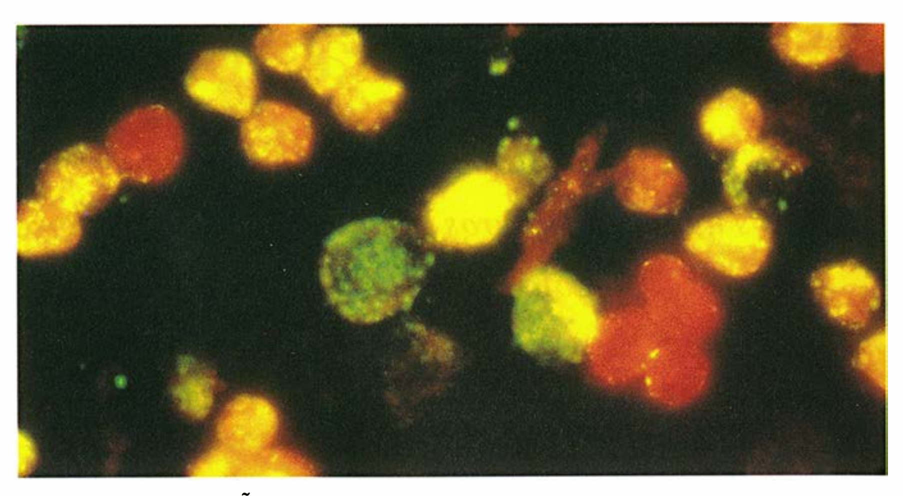
7. LOS BUNYAVIRIDAE Y LOS ARENAVIRIDAE tienen un ARN de una sola hebra. En los Bunyaviridae el ARN está dividido en tres segmentos (*izquierda*); el segmento largo cifra la ARN polimerasa, el mediano las proteínas de la envuelta y el cuarto la nucleocápside (la envuelta que protege el ARN). El ARN de los Arenaviridae está dividido en dos segmentos; el largo cifra la ARN polimerasa y el corto la nucleocápside, cuando se lee en un sentido, y las proteínas de la cubierta, cuando se lee en el opuesto. El tamaño de las partículas víricas de los Arenaviridae (con un diámetro máximo de 300 nanómetros) triplica el de la familia Bunyaviridae.

animales de laboratorio habituales, es decir los roedores, pues estos últimos son reservorios naturales de los arenavirus y los hantavirus.

Se pueden emitir hipótesis, sin embargo, sobre su modo de acción, distinguiendo dos grupos de virus, los que destruyen las células y los que perturban el sistema inmunitario de las células infectadas.

Entre los primeros, los virus citolíticos, se clasifican los virus de la fiebre de Crimea-Congo, el virus de la fiebre del valle del Rift, los dos filovirus *Marburg* y *Ebola* y el antepasado del virus causante de las fiebres hemorrágicas, el *Amaril*, responsable de la fiebre amarilla. Su duración de incubación suele ser corta, a menudo menos de una semana. Los casos graves se dan cuando interesan diversos órganos, en particular el hígado. La destrucción masiva de hepatocitos complica la síntesis de los factores de la coagulación, normalmente asegurada por estas células, lo que explica en parte los fenómenos hemorrágicos. Por otro lado, la presencia del virus modifica la superficie del endotelio vascular e induce, así, la agregación allí de las plaquetas, de modo que la coagulación intravascular consume los factores de la coagulación. Además, se disgregan las células del endotelio vascular, lo que se pone de manifiesto por la aparición de hemorragias o por la fuga plasmática, responsable del desarrollo de edemas o de hipotensión grave.

Los arenavirus actúan de otra forma. La duración de su incubación es más larga y, si bien invaden la mayor parte de los tejidos, no suelen dañarlos; en cambio, inhiben el sistema inmunitario, lo que se traduce en una aparición tardía de anticuerpos, a veces un mes después de los primeros signos clínicos. Los arenavirus disminuyen poco el número de plaquetas, pero las inactivan, y las afecciones neurológicas son frecuentes. En lo que respecta a los hantavirus, tampoco destruyen las células; tienen una duración de incubación larga, comprendida entre 12 y 21 días. La mayoría de los virus de este género provocan lesiones renales, aun cuando el virus responsable de la epidemia ocurrida en 1993 en Nuevo México se caracterizó por una afección pulmonar; sin embargo, unos y otros atacan las células endoteliales de la pared de los capilares, ya se trate de capilares renales o pulmonares. Los virus *Hantaan, Seul* y *Puumala* invaden las células de las paredes de los capilares renales, lo que se traduce en un edema y una reacción inflamatoria transitoria responsables de una insuficiencia renal; *Sin nombre* actúa sobre todo en los capilares pulmonares y acarrea la muerte por edema pulmonar agudo.



8. CELULAS DE RIÑON DE MONO. Se han utilizado para detectar la presencia de un hantavirus en un paciente: primero se infectan artificialmente las células de mono con hantavirus; si el paciente está contagiado por el mismo hantavirus, su sangre contendrá anticuerpos, que se aglutinan sobre las células de mono presentadoras de los antígenos hantavíricos. Un método de coloración por fluoresceína revela si la aglutinación ha tenido lugar, es decir, si el paciente está infectado por un hantavirus. Una de las células (*en verde, en el medio*) contiene numerosos granos verdes, acumulaciones intracitoplasmáticas de proteínas víricas.

Lucha y prevención

Los métodos de prevención contra estos virus son todavía limitados, por diversas razones: se trata en general de zoonosis, es decir, de enfermedades de animales transmisibles al ser humano, y capaces de producir epidemias. Es difícil, si no imposible, dominar las poblaciones de vectores y las de reservorios naturales, así como prever las modificaciones ecológicas que favorecen las epizootias. En el curso de la epidemia de Lassa y de Machupo, resultó eficaz la lucha contra los roedores vectores, pero, en general, no se pueden extender los métodos de erradicación a zonas rurales durante largos períodos.

Aparte de emprender acciones en el medio natural, han de tomarse precauciones en los laboratorios y en el medio hospitalario. En el laboratorio, los virus responsables de las fiebres hemorrágicas, identificados o no, deben manipularse siguiendo las condiciones de confinamiento máximo. Hablamos de un nivel de confinamiento P4, es decir: que la presión del laboratorio sea ligeramente baja, al objeto de que ninguna partícula potencialmente infecciosa se escape; y que los virus estén confinados en recintos estancos, donde la presión sea aún inferior a la reinante en el laboratorio. En el ámbito hospitalario, el riesgo de contagio de los internos con sangre o excretas de un paciente infectado es elevado para ciertos virus, y deben cumplirse a rajatabla diversas precauciones: el personal hospitalario debe llevar mascarilla, guantes y batas protectoras, y la orina y heces de los enfermos deben ser descontaminadas. El aislamiento en la cámara en depresión es una medida de seguridad suplementaria.

Además de las medidas de prevención que bastan en general para evitar la propagación de una epidemia, se dispone de dos vacunas: una contra la fiebre amarilla en humanos y otra contra el virus *Rift* para los animales. Una vacuna destinada a proteger al ser humano contra el virus *Junin* está en fase de experimentación a gran escala en Argentina. Por último, un medicamento antivírico, la ribavirina, se ha revelado eficaz, en China, en el transcurso de una epidemia causada por un hantavirus.

Desde la aparición del virus de la inmunodeficiencia humana, el surgimiento de nuevos virus inquieta a la población, que, tras el descubrimiento de la penicilina, creíase al abrigo de las grandes epidemias.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HANTAVIRUS EPIDEMIC IN EUROPE. B. Le Guenno, M. A. Camprasse, J. C. Guilbaut y cols., en *The Lancet*, vol. 343, páginas 114-115, 1993.

NEW ARENAVIRUS ISOLATED IN BRAZIL. Terezinha Lisieux y cols., en *The Lancet*, n.º 343, págs. 391-392, 1994.

FILOVIRUSES AS EMERGING PATHOGENS. C. J. Peters y cols., en *Virology*, vol. 5, páginas 147-154, 1994.

Moléculas dendrímeras

Los químicos pueden ya construir macromoléculas fractales. Estos nuevos polímeros cuentan, entre sus campos posibles de aplicación, la biotecnología y la protección del medio ambiente

Donald A. Tomalia

En el centro de Michigan, a lo largo del río Chippewa y a unos 210 kilómetros al sur de las Dunas del Oso Dormido del National Lakeshore, la tierra es muy mala para la siembra, pero adecuada para el arbolado. Miles de árboles de todas clases, con todas las ramificaciones y formas imaginables, abundan allí. Año tras año brotan nuevos vástagos, que se ramifican y cuyas ramas forman a su vez nuevas ramas, dando lugar a un lozano y variado bosque.

Cuando hace 20 años, cerca de mi casa, observaba estos árboles con la mente de un químico, me pregunté si los sistemas de ramas podrían servir para diseñar moléculas grandes, definidas con precisión, por adición de una rama tras otra sobre alguna sustancia inicial. La idea de adquirir tal control sobre la formación de una molécula me atrajo inmediatamente, desde un punto de vista tanto teórico como práctico, pero hasta finales de la década de los setenta no encontré una forma de llevar la idea a la práctica. Hoy en día, mi técnica, así como otras aproximaciones similares, están haciendo posible construir moléculas arborescentes que imitan a numerosas estructuras biológicas, incluyendo las proteínas. Existen buenas razones para pensar que dichas construcciones sintéticas revistan interés médico, industrial, electrónico y otros.

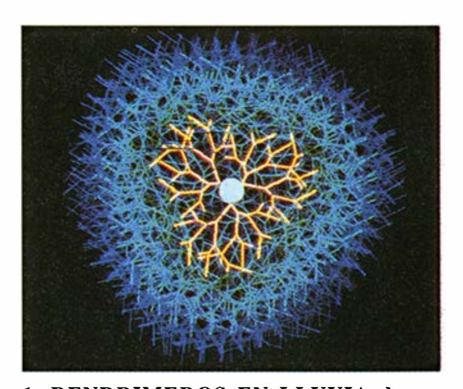
Tiempo atrás la naturaleza puso a punto exquisitas estrategias para manipular las estructuras de las moléculas necesarias para iniciar y mantener la vida. Los químicos han tratado durante años de alcanzar una maestría semejante sobre las moléculas que fabrican, y los químicos orgánicos han logrado un control notable en la síntesis de moléculas pequeñas complejas. Sin embargo, el objetivo de construir macromoléculas bien definidas ha sido más difícil de alcanzar.

La idea de dirigir el crecimiento molecular para fabricar dichas moléculas de gran tamaño con propiedades útiles surgió a partir de experimentos llevados a cabo en la década de los treinta por Hermann Staudinger, entonces en la Universidad de Friburgo. Consiguió unir entre sí unidades idénticas, o monómeros, en forma de cadenas de moléculas parecidas a espaguetis, llamadas polímeros en ovillo estadístico. El trabajo de Staudinger representó el primer intento fructífero de ensamblar macromoléculas a partir de componentes pequeños de estructura bien definida. Sin embargo, el investigador no poseía apenas control sobre la longitud de las cadenas de los polímeros, que abarcaban, sin solución de continuidad, desde el tamaño microscópico (en la escala de los nanómetros) hasta el macroscópico (en la escala de los milímetros o de los centímetros). Los polímeros resultaron de gran interés y mostraron propiedades valiosas; de hecho, muchos objetos corrientes se fabrican con polímeros en ovillo estadístico, como los aislantes de poliestireno, los envases de leche de polietileno o el plexiglás.

Unos diez años más tarde, Paul J. Flory, de la Universidad de Cornell, y Walter H. Stockmayer, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, cubrieron otra etapa en la búsqueda de macromoléculas, desarrollando un segundo tipo de polímeros, que se consigue reticulando o formando puentes en los polímeros en ovillo estadístico, entre varios puntos a lo largo de las cadenas. Los lazos y las conexiones resultantes dan lugar a estructuras tridimensionales rígidas denominadas polímeros reticulados. Su rigidez las hace insolubles en la mayoría de los líquidos, por lo que son útiles como materiales de recubrimiento en cascos de barcos de fibra de vidrio, en espumas de poliuretano o en sistemas epoxi.

Tanto en los polímeros en ovillo estadístico como en los reticulados, los monómeros se unen formando moléculas de largas cadenas serpenteantes, de longitudes y tamaños variables, cuya disposición interna detallada es imposible predeterminar por el químico. Mi preocupación a mediados de los setenta era cómo

DONALD A. TOMALIA es profesor de investigación y director de arquitectura y química nanoscópica en el Instituto Molecular de Michigan en Midland. Se graduó en química por la Universidad de Michigan, en el Flint College. En 1968, mientras trabajaba en síntesis de polímeros en los laboratorios de la compañía Dow Chemical en Midland, preparó su tesis de doctorado que defendió en la Universidad estatal de Michigan. Tomalia es cofundador, director y jefe de investigación de Dendritech, Inc. Sus campos de interés prioritario son los polímeros de estructura controlada, el reconocimiento molecular y la química nanoscópica.



1. DENDRIMEROS EN LLUVIA de estrellas, mostrados a la derecha y sobre estas líneas en corte transversal, con una molécula de amoníaco por núcleo. Este tipo de dendrímeros constan de tres "árboles" ramificados, parte de los cuales quedan resaltados en el corte transversal. Los árboles se construyeron sistemáticamente sobre el núcleo por medio de un proceso iterativo desarrollado por el autor y sus colegas.

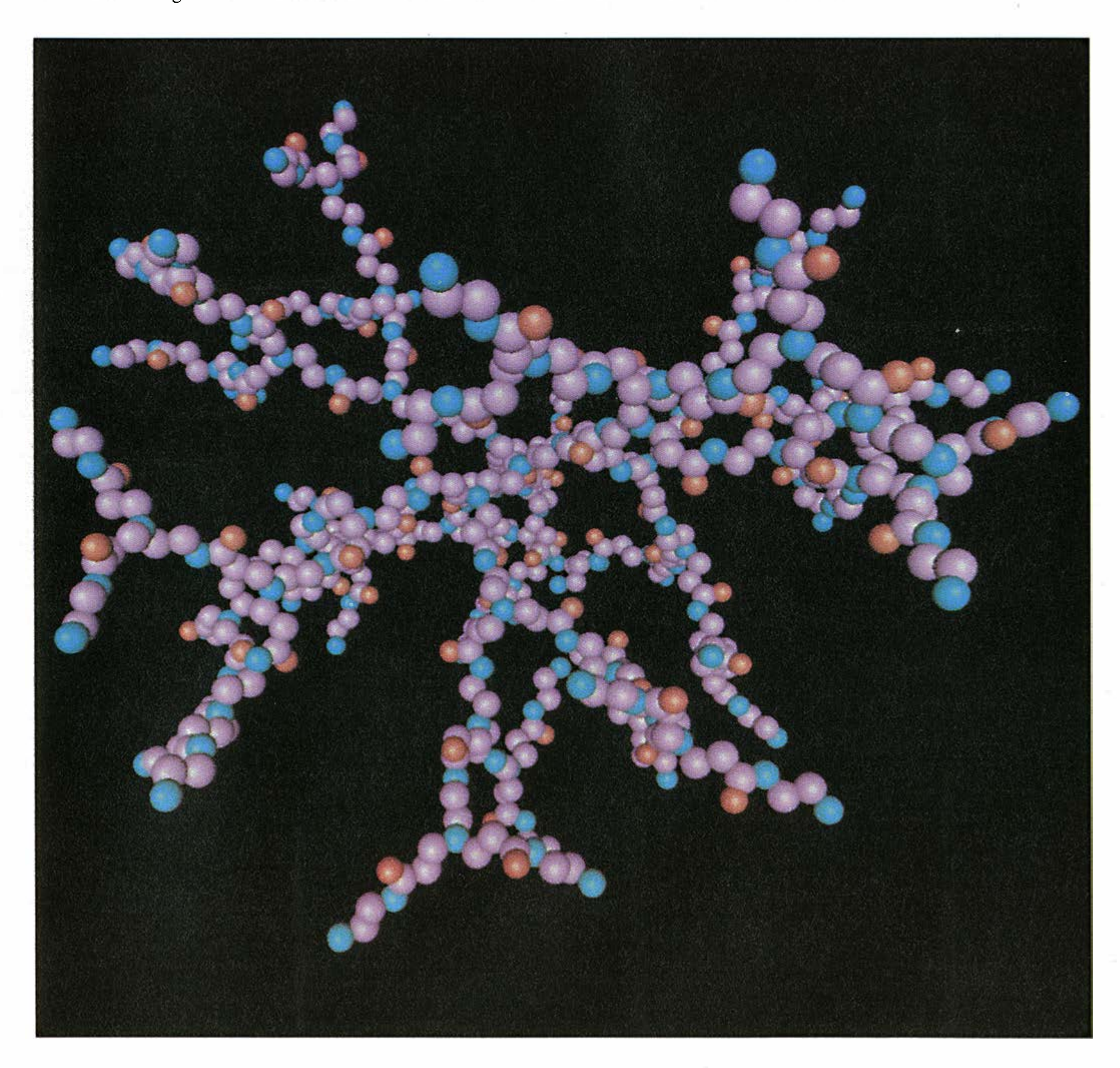
conseguir dicho control, y lo logré tras hacer un sorprendente descubrimiento en 1979.

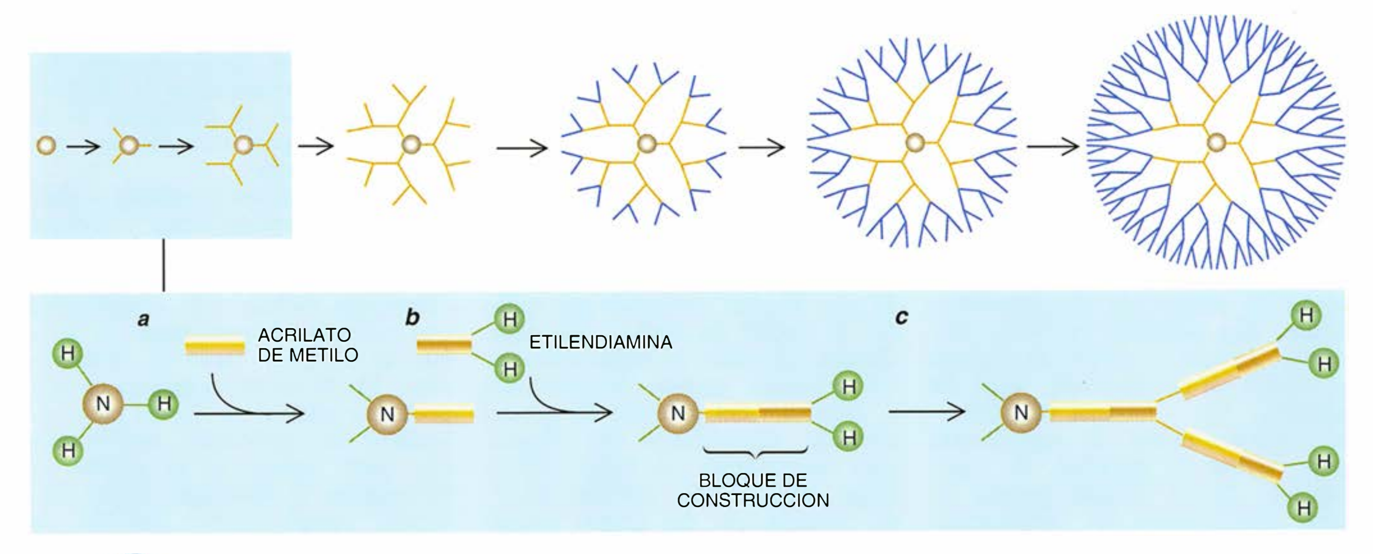
Añádase metanol y agítese

Un día de primavera estaba siguiendo, junto a varios colegas del laboratorio, nuestro procedimiento estándar de preparación de poliamidoaminas, unos polímeros en ovillo estadístico. Aunque la síntesis no requería el empleo de un disolvente, aquel día añadimos uno —metanol (CH_3OH)— al conjunto inicial de ingredientes para facilitar la agitación. No esperábamos que el metanol pudiera alterar químicamente los componentes de la reacción. El resto del proceso se realizó según lo acostumbrado: mezclamos el monómero acrilato de metilo ($C_4H_6O_2$) con etilendiamina ($C_2H_8N_2$).

Ante la sorpresa de todos, no obtuvimos el mismo polímero de siempre. En general, al mezclar los dos reactivos anteriores, se unían entre sí en una proporción de uno a uno, dando lugar a una cadena continua de gran longitud compuesta por unidades de acrilato de metilo y de etilendiamina colocadas de forma alternada. Sin embargo, cuando determinamos la estructura del producto de nuestra reacción, descubrimos una disposición sorprendente: no había cadenas largas, sino tan sólo unidades discretas formadas por dos grupos acrilato de metilo conectados a ambos extremos de una etilendiamina. En este caso, el metanol afectó a la reacción, facilitando aparentemente la eliminación de átomos de hidrógeno de la etilendiamina para reemplazarlos por acrilato de metilo.

Cuando repetimos el proceso —ahora añadiendo etilendiamina y acrilato de metilo sobre las estructuras simples ya existentes— llegamos a un compuesto incluso más complicado, que contenía 12 monómeros de acrilato de metilo y cinco de etilendiamina. Me di cuenta enseguida de que podíamos adaptar la técnica para ensamblar las moléculas ramificadas que había soñado en el pasado en los bosques de Michigan. Serían moléculas completamente distintas de los polímeros en ovillo estadístico o de los reticulados.







2. EL CRECIMIENTO DE UN DENDRIMERO tiene lugar por adición exponencial sobre una molécula núcleo (*arriba*). En este ejemplo, la molécula núcleo contiene un átomo de nitrógeno y tres átomos de hidrógeno (*detalle*). En primer lugar, los átomos de hidrógeno son reemplazados por una molécula de acrilato de metilo (*a*), tal como se muestra para uno de los tres átomos. Una segunda molécula —etilendiamina— se añade entonces (*b*). Juntos, los monómeros constituyen los bloques de construcción básicos del dendrímero. El extremo libre de esta unidad posee dos enlaces nitrógeno-hidrógeno, por lo que las dos etapas pueden iterarse para fijar dos secciones nuevas sobre la estructura creciente (*c*). Ahora el extremo libre de la estructura posee cuatro enlaces nitrógeno-hidrógeno, lo que permite la unión subsiguiente de cuatro unidades. La repetición del proceso da lugar a la intrincada estructura final. (El color azul resalta el crecimiento de tipo fractal.) Esta arquitectura bien definida contrasta con la irregular estructura de un polímero en ovillo estadístico (*izquierda*).

Fijándome en la estructura de los árboles, había pensado en un sistema de crecimiento molecular que diera lugar a grandes estructuras simétricas por etapas, lo mismo que, tras sucesivas ramificaciones estacionales, se forma gradualmente un amplio conjunto de ramas sobre un viejo árbol. Sobre un centro reactivo de una molécula que haga de núcleo inicial, se podría adicionar una segunda molécula lineal, formando un tallo. Dos moléculas más, semejantes a la lineal anterior, se podrían unir al extremo libre de dicha segunda molécula, creando una estructura en Y. La reiteración de este proceso, añadiendo como mínimo dos moléculas más sobre los extremos de cada una de las nuevas Y, llevaría rápidamente a un sistema ordenado de monómeros.

Esta aproximación básica dio lugar a la aparición de una arquitectura polimérica enteramente nueva, en la que capas concéntricas de monómeros —parecidas a los catafilos de una cebolla— se van construyendo alrededor de una única molécula (la molécula núcleo inicial) situada en el centro. A medida que las capas se van formando alrededor del núcleo, surge la naturaleza fractal, o dendrítica, de la estructura creciente: grandes zonas se asemejan a las pequeñas Y formadas por tripletes de monómeros. Al propio tiempo, la estructura interna va tomando un aspecto estrellado. Por eso denominamos "dendrímeros en lluvia de estrellas" a nuestros productos finales.

Propiedades ajustables

Nuestros primeros dendrímeros se crearon mediante la repetición de dos simples operaciones que todavía empleamos hoy en día. Cuando construimos dendrímeros, en general partimos de una molécula de amoníaco, que consiste en un átomo de nitrógeno central unido a tres átomos de hidrógeno. Sobre esta molécula añadimos suficiente metanol para facilitar la sustitución de los tres hidrógenos de la molécula de amoníaco por unidades de acrilato de metilo. A continuación añadimos el segundo monómero, la etilendiamina, que se une al extremo libre de cada uno de los tres componentes de acrilato de metilo. Como la etilendiamina contiene un grupo amina (NH_2) en su extremo no enlazado, las tres ramas del amoníaco central acaban ahora en un átomo de nitrógeno del que emergen dos átomos de hidrógeno. En otras palabras, las tres terminaciones exteriores se parecen al amoníaco del núcleo, con la diferencia de que hay seis átomos de hidrógeno disponibles para reaccionar con monómeros adicionales de acrilato de metilo, en lugar de tres.

Del mismo modo que somos capaces de reemplazar los tres átomos de hidrógeno del amoníaco por tres monómeros de acrilato de metilo, podemos reemplazar los seis átomos de hidrógeno de los tres grupos amina por seis unidades de monómero. Para ser más precisos, en esta segunda iteración del proceso de dos etapas, enganchamos seis moléculas de acrilato de metilo a la estructura en expansión, y unimos etilendiamina a cada uno de los monómeros. Los seis grupos monómeros etilendiamina enganchados —que constituyen lo que llamamos la segunda generación del dendrímero— proporcionan 12 átomos de hidrógeno para iniciar la tercera generación. Cada generación sucesiva incrementa exponencialmente el número de hidrógenos disponibles para reaccionar.

Pronto nos dimos cuenta de que esta aproximación, conocida como química de amplificación, podía repetirse hasta la novena o décima generación, sin que la estructura se torne demasiado grande para albergar monómeros adicionales en ramas perfectas. El proceso puede dar lugar a macromoléculas enormes, algunas con masas un millón de veces mayores que la del hidrógeno (que tiene una masa atómica unidad) y con diámetros más de 300 veces superiores al del hidrógeno. Además, la superficie exterior puede contener centenares o incluso millares de moléculas reactivas, denominadas grupos funcionales. Tales grupos pueden proceder de los mismos monómeros empleados en la construcción del dendrímero, pero también pueden ser grupos funcionales distintos, según los requerimientos de la aplicación deseada.

Como los dendrímeros tienen for-

mas muy regulares y predecibles de crecimiento, los químicos pueden manipular las características, no sólo del interior de la molécula, sino también de la superficie exterior. Y pueden regular además la forma en que la molécula reaccionará químicamente con otras moléculas. En resumen, podemos especificar el tamaño, la forma y la reactividad de los dendrímeros, lo que nos permite manipular las propiedades de la macromoléculas que fabricamos, de un modo hasta entoces imposible de conseguir.

De hecho, el control ajustable de las propiedades físicas y químicas de los dendrímeros constituye su característica más notable. Los químicos consiguen dicho control a través de una cuidadosa elección de los reactivos empleados para construir los dendrímeros. Por ejemplo, el tamaño global de un dendrímero viene determinado por el número de generaciones que contiene, por la longitud de los monómeros empleados en cada generación y por los ángulos entre los monómeros —factores que dependen del modelado químico de dichas moléculas.

La estructura final también puede moldearse eligiendo la molécula del núcleo inicial. Si bien los primeros dendrímeros se construyeron a partir de un núcleo de amoníaco, hemos explorado desde entonces derivados de amoníaco y familias de compuestos completamente diferentes, como moléculas de fósforo o derivados de silicona, anillos de benceno (C_6H_6) y cadenas carbonadas (que contienen átomos de hidrógeno, y a veces de oxígeno, unidos a los carbonos). Cada nueva combinación de molécula núcleo y de monómeros engendra una estructura dendrímera característica, con propiedades diferenciadas. Por ejemplo, si partimos de una molécula derivada del amoníaco pero con sólo un átomo de hidrógeno, el dendrímero se parecerá a la cabeza de una seta. Con dos hidrógenos activos, se parecerá más a una molécula en forma de riñón que al esferoide simétrico que se obtiene con un núcleo de puro amoníaco.

Como ocurre frecuentemente en ciencia, no éramos los únicos investigadores que descubrimos la forma de construir moléculas ramificadas. Fritz Vögtle y su equipo, de la Universidad de Bonn, investigaron la posibilidad de construir moléculas ramificadas al mismo tiempo que nosotros. Tras fabricar nuestros primeros dendrímeros, supimos que el grupo de Vögtle había empleado un tipo de química de amplificación semejante al nuestro para sintetizar pequeñas moléculas ramificadas. Las estructuras del otro equipo investigador consistían principalmente en derivados de amoníaco unidos al monómero acrilonitrilo. Los investigadores alemanes llamaron a sus productos “moléculas en cascada”. Otros investigadores alemanes y holandeses han demostrado, más recientemente, que, empleando un catalizador diferente en el proceso, el procedimiento de Vögtle podría también adaptarse a la fabricación de grandes dendrímeros.

Desde 1979 numerosos grupos han empleado métodos similares a los nuestros y a los de Vögtle para sintetizar supermoléculas dendríticas. En 1985, George R. Newkome, de la Universidad de South Florida, fue pionero de un nuevo tipo de química de amplificación para producir moléculas arborescentes, que denominó arboroles.

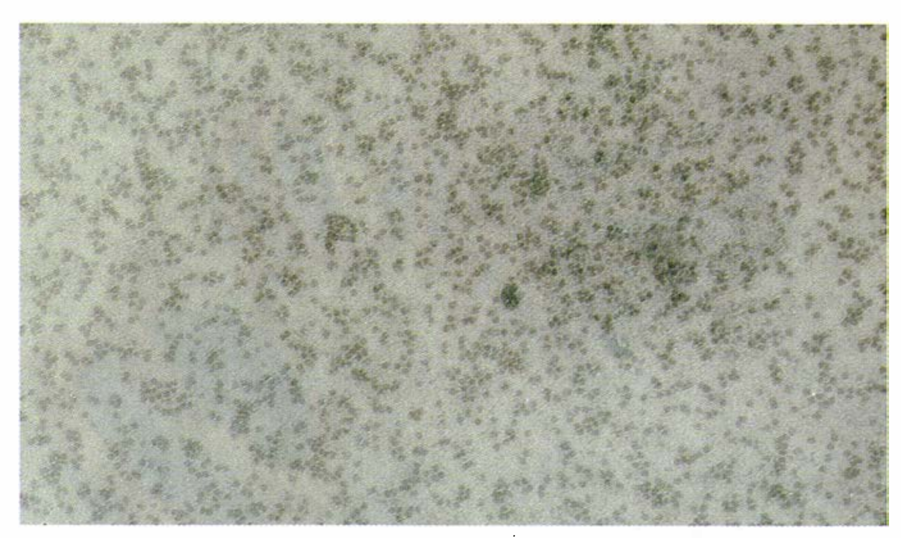
Otra aproximación interesante a la síntesis de dendrímeros fue descrita en 1989 por Jean M. J. Fréchet y Craig J. Hawker, de la Universidad de Cornell, e, independientemente, en 1990 por Timothy M. Miller y Thomas X. Neenan, de los laboratorios AT&T Bell. En vez de emplear el llamado método divergente —partiendo del interior y construyendo hacia afuera—, como hace nuestro laboratorio, dichos químicos emplearon el método de síntesis convergente. Construyeron primero ramas individuales y luego engancharon las unidades a una molécula como núcleo central.

Entre 1980 y 1990 se publicaron menos de doce artículos sobre este tema, pero en años más recientes ha habido una explosión de actividad. Se han descrito más de 20 tipos de familias de dendrímeros, con más de 100 superficies distintas. Aparentemente, una amplia variedad de monómeros —incluyendo metales— puede emplearse para crear dendrímeros. Por otra parte, todo indica que cualquier grupo funcional que aparezca en un libro de texto de química orgánica puede unirse a la superficie de un dendrímero para llevar a cabo tareas prefijadas.

Paralelismos en la naturaleza

La química no consiste únicamente en conectar átomos y trasponerlos de formas diversas. Es una filosofía, una forma de pensamiento sobre la jerarquía dimensional del universo, desde los átomos más simples hasta las moléculas y los fenómenos más complejos. El orden de átomos y de moléculas halla su reflejo en la naturaleza, desde los esquemas ramificados de los árboles y de los arrecifes de coral hasta las redes dendríticas de los conductos de aire de los pulmones y de los vasos sanguíneos del sistema circulatorio. El sentido de tales patrones universales no está del todo claro, pero son conexiones fascinantes de contemplar.

Por ejemplo, los dendrímeros poseen sorprendentes semejanzas de organización con los átomos. A medida que unos y otros se van formando, se desarrollan curiosos esquemas aritméticos y geométricos. Dichos esquemas pueden implicar distintas estructuras repetitivas o secuencias regulares de números. Por ejemplo, el número de monómeros de un dendrímero con un núcleo de amoníaco crece en una secuencia bien definida: 3, 6, 12, 24, 48, y así sucesivamen-



3. DENDRIMEROS INDIVIDUALES (*puntos negros*), cada uno de un diámetro de unos 11 nanómetros, según se observan en un microscopio electrónico. Son similares en tamaño a numerosas macromoléculas biológicas. Los dendrímeros pueden asociarse también en agrupaciones mucho mayores.

te. De esta forma, la amplificación concéntrica del dendrímero se asemeja a la acumulación de electrones en los sucesivos elementos del sistema periódico. El número de electrones en cada orbital atómico es también limitado. La nube electrónica más interna de un átomo no puede contener más de dos electrones, mientras que la primera generación de un dendrímero basado en amoníaco no puede contener más que su número de saturación de tres monómeros.

Se pueden establecer también paralelismos entre la red ramificada del interior de los dendrímeros y ciertos esquemas del desarrollo biológico. El crecimiento dendrítico de estas moléculas se asemeja al crecimiento exponencial observado durante la mitosis celular, proceso por el que una célula se transforma en dos, dos células en cuatro, y así sucesivamente. Además, el núcleo original del dendrímero determina su estructura final, exactamente igual que las características de las células que se dividen adquieren sus propiedades por el contenido genético de la célula original.

Las semejanzas entre dendrímeros y átomos (los bloques de construcción fundamentales de la naturaleza) y el paralelismo entre desarrollo dendrítico y biológico pueden tener implicaciones de tipo práctico. Sugieren que conjuntos de estructuras individuales o incluso mayores podrían ser explotados como réplicas sintéticas de moléculas biológicas. Esta idea viene avalada por el hecho de que los dendrímeros son aproximadamente del mismo tamaño que algunas de las moléculas más importantes de la naturaleza, como las enzimas, los anticuerpos, el ADN, el ARN y los virus.

Con frecuencia los científicos se maravillan de la forma en que los organismos vivos emplean nuestras más sofisticadas técnicas de manipulación y combinación de átomos para constituir macromoléculas biológicas. Aunque los dendrímeros representan una entre varias aproximaciones para la construcción de moléculas de gran tamaño, parece claro que estas estructuras podrían representar la base de un nuevo conjunto de compuestos químicos nanoscópicos para la construcción de moléculas complejas que pudieran imitar a los compuestos biológicos en tamaño, forma y función.

Uno de los muchos indicios estimulantes de posibles aplicaciones prácticas de los dendrímeros ha venido recientemente de mi laboratorio y del de James R. Baker, Jr., del Hospital de la Universidad de Michigan, así como, independientemente, del laboratorio de Francis C. Szoka, Jr., de la Universidad de California en San Francisco. Hemos obtenido pruebas de que los dendrímeros pueden ser algún día valiosos en terapia génica, como vehículos para transportar secuencias de ADN hasta el interior de las células.

Dendrímeros que suministran ADN

Las estructuras de transporte de ADN que nos interesaban son conjuntos de proteínas denominados histonas. En el cuerpo humano, el ADN del núcleo se encuentra enrollado alrededor de dichos conjuntos. Nuestros dendrímeros son tan parecidos en forma y tamaño a las histonas, que el ADN se enrolla a su alrededor igual que lo hace en torno al complejo proteico natural. El ADN que estudiamos contenía una secuencia genética que determina la proteína luciferasa, la sustancia que proporciona a las luciérnagas su luminiscencia. El gen es fácil de seguir: si se transfiere con éxito a una nueva célula y permanece funcional, la célula comienza a brillar.

En experimentos en placa de Petri, combinamos dendrímeros parecidos a histonas y el gen de la luciferasa con cerca de 30 distintos tipos de células de diversas especies, incluyendo células humanas. En casi todos los casos, los dendrímeros transportaron material genético hacia el interior celular produciendo la proteína luciferasa. (Queda mucho todavía por conocer acerca del mecanismo en virtud del cual la unidad dendrímero-ADN halla su camino hasta el interior de las células.)

Tenemos otras razones para sospechar la posible aplicación de los dendrímeros en terapia génica. Las estructuras pueden diseñarse para ser dirigidas a células objetivo específicas. Por ejemplo, si se adhieren ciertas sustancias, como azúcares o proteínas, las superficies de los dendrímeros hacen que estos polímeros se adhieran más favorablemente a ciertas membranas celulares que a otras. Seleccionando bien los componentes que añadimos, podemos dirigir una combinación dendrímero-ADN hacia tipos específicos de células.

Además, los dendrímeros pueden presentar una ventaja sobre el método habitual de suministrar material genético a las células. Hoy suele recurrirse a virus modificados para introducir genes en las células. Pero los virus pueden desencadenar una respuesta inmunitaria que destruya los agentes víricos antes de que el material genético alcance el punto deseado. Si la respuesta inmunitaria es fuerte, puede incluso dañar al paciente. En ninguno de nuestros estudios de laboratorio los dendrímeros han provocado una respuesta tan violenta. Numerosos grupos de investigación están también desarrollando técnicas para transportar otros tipos de moléculas, como fármacos, hasta los puntos deseados del organismo.

En diciembre del año pasado, Gerard van Koten y su grupo, de la Universidad de Utrecht, descubrieron

4. EL ADN SE ENROLLA ALREDEDOR de dendrímeros seleccionados de forma parecida a como lo hace con conjuntos de proteínas histonas en el núcleo celular. Esta propiedad es una de las muchas que indican que los dendrímeros pueden ser útiles en terapia génica, como vehículos para suministrar genes modificados a las células.

otra aplicación de los dendrímeros que podría revestir sumo interés en la industria química. En muchos procesos de fabricación, las plantas químicas requieren catalizadores para reforzar la eficacia de determinadas reacciones. La parte exterior de un dendrímero puede recubrirse por numerosos centros catalíticos, de forma que un solo dendrímero induzca múltiples reacciones catalíticas. Tales dendrímeros son fácilmente solubles en la mezcla de reacción, lo que contribuye a facilitar la catálisis. Además, el gran tamaño de las estructuras debería permitir que los dendrímeros se recuperasen fácilmente de la mezcla de reacción por métodos de filtración, con lo que podrían utilizarse de nuevo.

La capacidad de enganchar sustancias que puedan servir de catalizadores o de agentes biosensores sobre la superficie de los dendrímeros ha atraído la atención de los laboratorios de investigación del ejército de los Estados Unidos. En colaboración con H. Dupont Durst y sus colegas de dicho centro, estamos estudiando la posibilidad de utilizar dendrímeros para detectar agentes biológicos o químicos peligrosos para el entorno.

Sea en la industria química, en el campo farmacéutico o en aplicaciones a la defensa del medio ambiente, los dendrímeros constituyen prometedoras supermoléculas cuyas propiedades se pueden organizar. Esperamos poder explorar el potencial completo de esta versátil e interesante nueva clase de polímeros.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

STARBURST DENDRIMERS. MOLECULAR-LEVEL CONTROL OF SIZE, SHAPE, SURFACE CHEMISTRY, TOPOLOGY, AND FLEXIBILITY FROM ATOMS TO MACROSCOPIC MATTER. Donald A. Tomalia, Adel M. Naylor y William A. Goddard III en *Angewandte Chemie, International Edition in English*, vol. 29, n.º 2, págs. 138-175; 1990.

DENDRIMERS, ARBOROLS, AND CASCADE MOLECULES: BREAKTHROUGH INTO GENERATIONS OF NEW MATERIALS. Hans-Bernhard Mekelburger, Wilfried Jaworek y Fritz Vögtle en *Angewandte Chemie, International Edition in English*, vol. 31, número 12, págs. 1571-1576; diciembre de 1992.

FUNCTIONAL POLYMERS AND DENDRIMERS: REACTIVITY, MOLECULAR ARCHITECTURE, AND INTERFACIAL ENERGY. Jean M. J. Fréchet en *Science*, vol. 263, págs. 1710-1715; 25 de marzo de 1994.

STARBURST/CASCADE DENDRIMERS: FUNDAMENTAL BUILDING BLOCKS FOR A NEW NANOSCOPIC CHEMISTRY SET. Donald A. Tomalia en *Advanced Materials*, volumen 6, n.os 7-8, págs. 529-539; julio-agosto de 1994.

El detector de microcinta de silicio

Producidos con idénticos medios que los circuitos integrados, estos detectores posibilitaron el descubrimiento reciente del quark cima. En ellos se confía para abordar otros experimentos cruciales

Alan M. Litke y Andreas S. Schwarz

El silicio, elixir de la revolución electrónica, es bien conocido como material de extraordinaria adaptabilidad. Hoy día, transcurrido casi medio siglo desde los descubrimientos que anunciaban la presente invasión —ordenadores por doquier, técnicas de comunicaciones, células fotovoltaicas—, su versatilidad permite apuntar hacia metas más ambiciosas. Los años venideros prometen la aparición de micropastillas ("chips") que posibiliten la comunicación electrónica con los nervios humanos y de máquinas diminutas capaces de realizar delicadas intervenciones de microcirugía.

Otra aplicación fascinante consiste en la detección de partículas dotadas de carga con el fin de escudriñar el corazón mismo de la materia mediante una suerte de microscopio basado en el silicio. Tras un desarrollo de quince años, el detector de microcinta de silicio puede medir la posición de las partículas dentro de un margen no mayor de 10 micrometros —precisión 10 veces superior a la alcanzada con las anteriores técnicas electrónicas de detección de partículas—, lo cual ha abierto nuevas vías de experimentación en la física de partículas y otras ramas de la ciencia.

Conjugando la técnica puntera con la física de altas energías, estos detectores han posibilitado la confirmación de la existencia del quark cima, por tanto tiempo buscado. Este trabajo recientemente terminado ha establecido con absoluta certeza la existencia de tal partícula; sin embargo, no es más que uno de los múltiples proyectos en los que dichos detectores permiten abordar cuestiones fundamentales que de otro modo serían mucho más espinosas. Destaca entre ellos la "caza" del bosón de Higgs, misteriosa y esquiva partícula que en opinión de los físicos impregna la materia con masa.

Nuestros objetivos van mucho más allá de la física de partículas. Gracias a la versatilidad y riqueza de la técnica del silicio, se han preparado nuevos tipos de detectores para extensas aplicaciones científicas. Se investigan con ahínco desde la astronomía por rayos X y rayos gamma hasta la obtención de imágenes para medicina. Sin duda, el detector de microcinta se inscribe en una amplia revolución de la formación de imágenes con fines científicos, dentro de la cual se encomienda a los semiconductores la detección de la luz, de los rayos X, de partículas dotadas de carga e incluso de señales neurofisiológicas. De este modo, los detectores son un valioso ejemplo de la floreciente simbiosis entre ciencia y técnica.

En un detector de cinta de silicio, las partículas se detectan por medio de diodos, calles "de sentido único" electrónicas, que dejan pasar la corriente en un sentido pero no en el contrario. En esta capacidad de bloquear el paso de corriente reside toda la utilidad del diodo como elemento detector; si no fuera así, las fluctuaciones estadísticas de una corriente de gran magnitud enmascararían las débiles señales causadas por la partícula que se detecta.

Mediante el recurso a técnicas de fabricación de circuitos integrados, se depositan los diodos sobre obleas de silicio. Aunque admiten cualquier configuración geométrica, lo habitual es disponerlos como cintas paralelas, siendo cada cinta un diodo de varios centímetros de longitud. La separación típica entre cintas es de 25 micrometros, con error menor de una pequeña fracción de micrometro.

Una partícula dotada de carga que atraviesa una oblea, o un rayo X absorbido por ella, genera una señal eléctrica en un reducido número de cintas. Esta señal indica, en una sola dimensión, el lugar donde la partícula incidió en la oblea, dentro de un margen equivalente a una fracción de la separación entre cintas. Para la separación típica mencionada, la resolución sería de 5 a 10 micrometros. En la mayoría de los experimentos importantes, se perfeccionan los instrumentos implantando detectores en ambas caras de la oblea, de suerte que formen cierto ángulo las cintas de una cara con las de la otra cara (también podrían adherirse entre sí dos obleas de la misma configuración básica). Estos detectores de doble cara dan dos coordenadas independientes de un impacto, con lo que el punto queda perfectamente determinado.

Transformar un pedazo de silicio virgen en un instrumento de tal precisión requiere un tratamiento especial. Las propiedades eléctricas del silicio se alteran, de modo sutil aunque notable, al añadirle una pizca de fósforo por un lado, un toque de boro por otro y ulteriores ingredientes muy escogidos. Para ello se parte de una delgada oblea de silicio cristalino, que suele tener unos 300 micrometros de espesor y 10 centímetros de diámetro. Su estructura cristalina es como la del diamante: cada átomo está rodeado por cuatro átomos equidistantes y comparte con cada uno de ellos uno de sus cuatro electrones externos.

A continuación, este silicio de suma pureza se "dopa" ligeramente con un átomo contaminante, como el fósforo, que tiene cinco electrones externos. (Con razón se considera "ligero" el dopado: sólo hay un átomo de impureza en unos 50.000 millones de átomos de silicio.) A semejanza del silicio, cada átomo de

fósforo que anida en la red cristalina comparte cuatro de sus electrones externos con cuatro vecinos de silicio, y el quinto electrón puede liberarse con facilidad para formar una corriente eléctrica. Se denomina tipo *n* esta clase de dopado, donde *n* alude a la carga negativa que transporta el electrón libre.

Una vez dopada adecuadamente la oblea, se implantan en ella cientos o incluso miles de microcintas aplicando las técnicas habituales en microelectrónica: fotolitografía o implantación de iones. Se forma cada cinta implantando en la superficie de la oblea una línea de átomos contaminantes de 5 a 10 micrometros de anchura y unos 0,05 micrometros de espesor. Para esta implantación se utilizan átomos de boro, con tres electrones externos; esta característica determina que, al sustituir un átomo de silicio por otro de boro en la red cristalina, éste adquiere enseguida un cuarto electrón enlazándose a los cuatro silicios contiguos. La adquisición de este electrón suplementario crea una ausencia de electrón o "hueco" en otro lugar del cristal. El silicio así dopado, con átomos de impureza que tienen tres electrones externos, es de tipo *p*, ya que el vehículo de carga en este caso, el hueco, equivale a una partícula dotada de carga positiva.

En consecuencia, el diodo está formado por un material de tipo *p*, un material de tipo *n* y una interfaz o "unión" entre ambos. En la región de dicha unión, los electrones del material *n* se difunden en el de tipo *p* y allí son neutralizados por los huecos, dejando atrás átomos de impureza ionizados a uno y otro lado de la unión. (La difusión de huecos de la región *p* en la región de tipo *n* tiene el mismo efecto.) Estos átomos fijos y dotados de carga crean un campo eléctrico que actúa a modo de barrera, tendiendo a mantener los huecos en el lado *p* y los electrones en el lado *n*. Resultado de ello es una fina región de "empobrecimiento" en la unión, libre de portadores de carga y sometida a un intenso campo eléctrico. Suficientemente ampliada, esta región de empobrecimiento es la zona donde se detectan las partículas cuando el diodo forma parte de un detector de microcinta.

Para que sea eficaz la detección de partículas cargadas o de rayos X, la región de empobrecimiento debe alcanzar la máxima profundidad posible. Cuanto mayor sea la profundidad, más largo será el trayecto que recorre una partícula cargada, generando una señal a su paso por la oblea, y por tanto esta señal será más intensa. En el caso de los rayos X, aumenta la eficacia de la detección porque hay más material dedicado a la absorción.

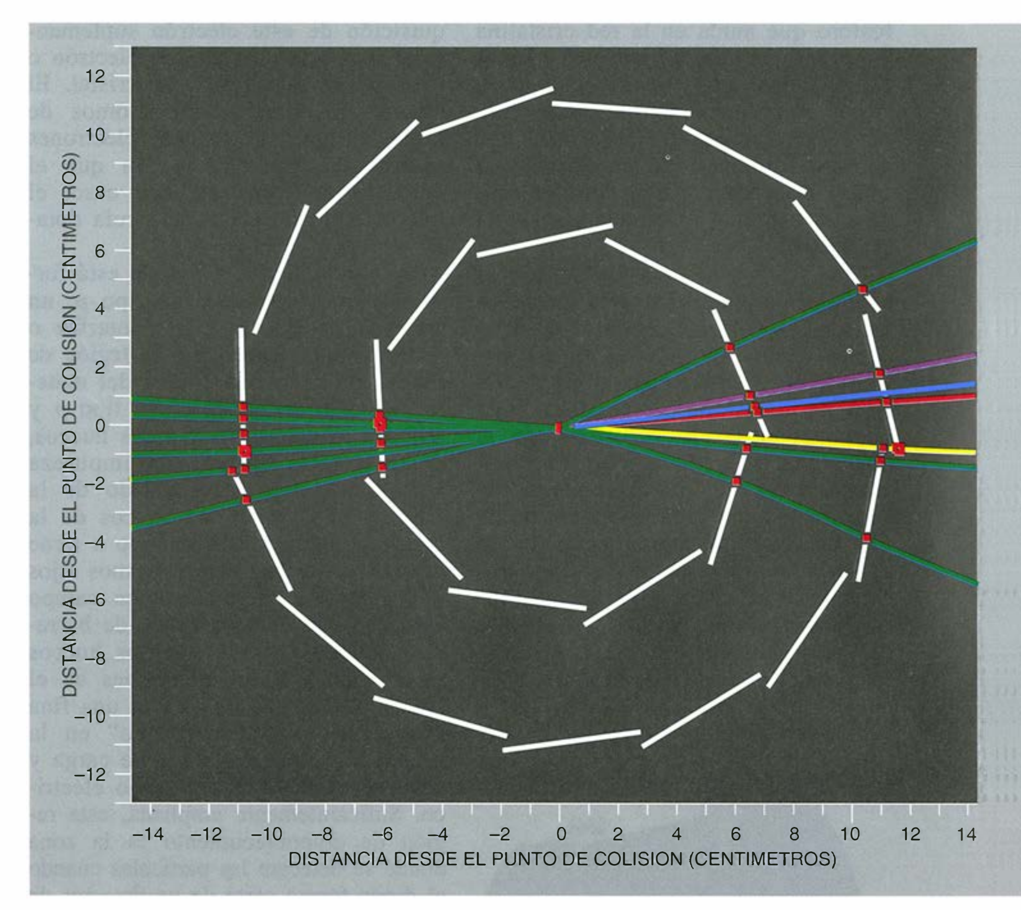
La aplicación al diodo de una tensión de la polaridad apropiada incrementa la profundidad de la zona de empobrecimiento. En el detector de microcintas, se adhiere un terminal negativo a las cintas de tipo *p* y un terminal positivo al sustrato de tipo *n*. Por efecto de la tensión, los portadores de carga son apartados de la unión, provocando la expansión de la zona de empobrecimiento.

ALAN M. LITKE Y ANDREAS S. SCHWARZ colaboraron en los años ochenta en el primer sistema de microcintas de silicio para detección de partículas de altas energías en colisiones de haces, proyecto realizado en el acelerador lineal de Stanford. Litke enseña física en la Universidad de California en Santa Cruz. Actualmente trabaja en el experimento Aleph del CERN, laboratorio europeo de física de partículas próximo a Ginebra. Schwarz se halla adscrito al DESY, laboratorio alemán de física de partículas de Hamburgo, donde participa en un experimento que estudiará las sutiles diferencias de comportamiento entre materia y antimateria.

1. EL DETECTOR DE VERTICE DE SILICIO es el corazón de un sistema de detección de partículas mucho mayor, llamado Aleph (*arriba*). Los haces inciden en el centro del detector (*abajo*), dentro de las dos capas concéntricas y cilíndricas de módulos detectores de microcinta. Cada módulo consta de cuatro obleas de silicio para la detección de partículas y de varias pastillas de amplificación, soldadas entre sí por innumerables hilos (*derecha*). En la fotografía no son visibles las cintas detectoras individuales implantadas en la oblea de silicio.

La región empobrecida del diodo se encuentra ya preparada para funcionar como detector de partículas. Cuando la atraviesa una partícula cargada, se produce una interacción eléctrica con la red, depositando energía y liberando pares electrón-hueco en una estrecha columna a lo largo de su trayectoria. Bajo la influencia del campo eléctrico que crean los átomos de impureza ionizados, los electrones y los huecos se desplazan en direcciones opuestas, acercándose los huecos a las cintas. El movimiento de estos portadores de carga genera una señal eléctrica en una o en varias cintas cercanas. Además, dado que estos portadores liberados por la partícula invasora recorren sólo una distancia muy corta, la señal se genera en unas 2 centésimas de microsegundo.

Una vez generadas, estas señales deben amplificarse y registrarse antes de poder utilizarse para determinar un punto de la trayectoria de la partícula. Desempeñan estas funciones cruciales unas pastillas electrónicas de lectura especiales, equipadas con una red de circuitos amplificadores de densidad comparable a las cintas implantadas sobre la oblea detectora. Cada una de las cintas del detector se suelda por ultrasonidos al amplificador que le corresponde en una pastilla de lectura, mediante un hilo de aluminio de la cuarta parte de grosor de un cabello humano.



2. LA BREVE VIDA DE LA PARTICULA se registra en el sistema Aleph mediante anillos concéntricos de detectores de microcinta de silicio, representados por las líneas blancas de la imagen superior. Los cuadrados rojos indican en qué lugares las partículas cargadas (*líneas de colores*) han atravesado los detectores dejando una señal detectada. Estas partículas se crearon por la aniquilación violenta de un elec-

De estas particularidades deriva la superior resolución espacial de los detectores de microcinta, su verdadera razón de ser. Antes de aparecer estos detectores en los años ochenta, el seguimiento de la partícula se realizaba por medios electrónicos a través de un gas ionizado, detectándose las señales sobre un hilo conductor. Las cámaras de hilos gaseosas desarrolladas hace ahora 27 años siguen desempeñando un papel esencial en todos los experimentos de física de altas energías actuales y en proyecto, y su invención, que supuso un avance muy notable, valió el premio Nobel de física a Georges Charpak en 1992. Con todo, los detectores de microcinta alcanzan una precisión diez veces superior.

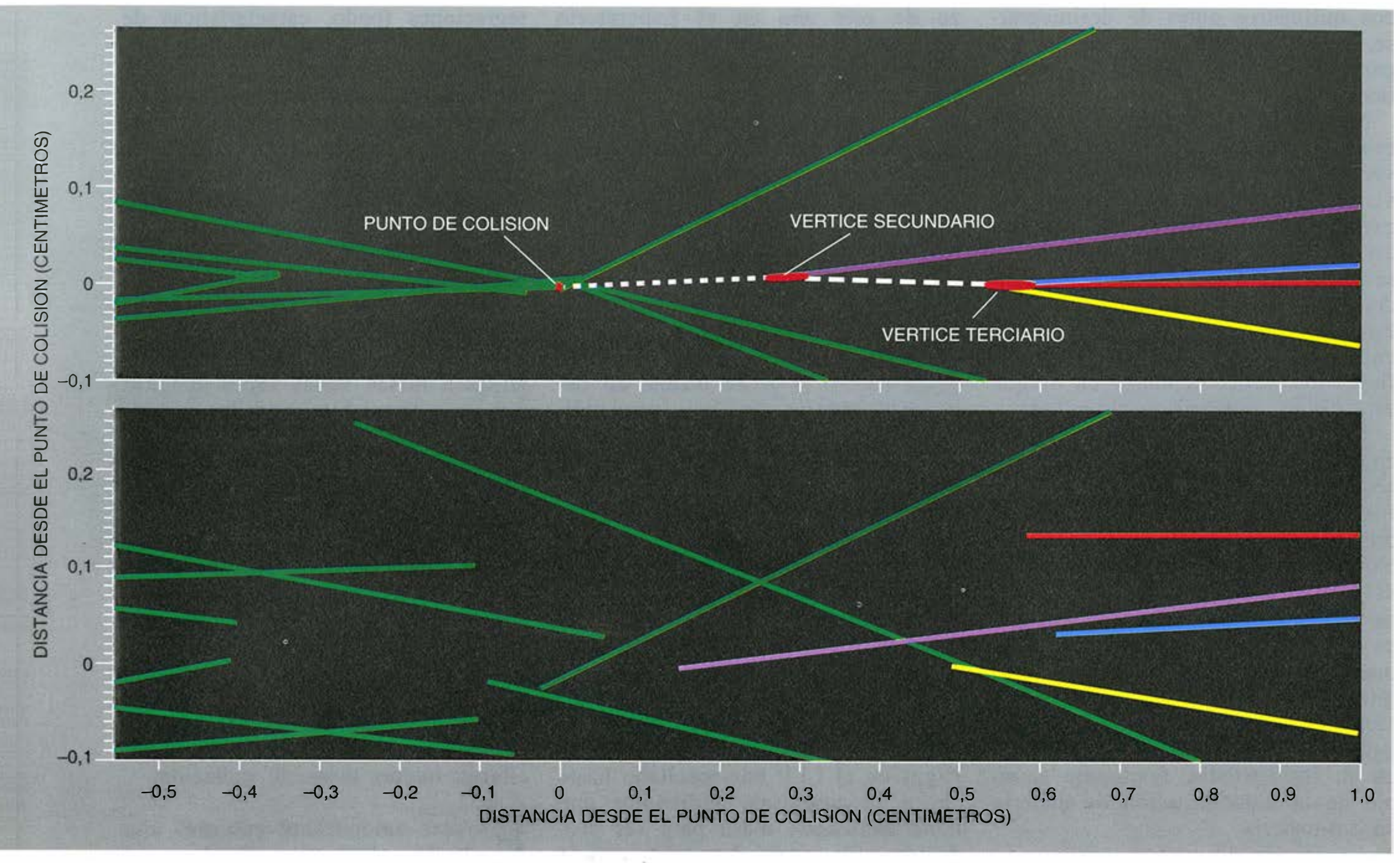
Aunque hayan brotado aplicaciones inicialmente insospechadas, los detectores de microcinta de silicio respondieron a una necesidad científica concreta: la detección y estudio de partículas "con encanto", es decir, las que contienen el quark encanto, uno de los seis quarks del modelo estándar de la física de partículas que describe los componentes básicos de la materia y sus interacciones. De acuerdo con esta teoría, la materia se compone de seis quarks (arriba, abajo, encanto, extraño, cima y fondo), además de las seis partículas denominadas leptones y las 12 antipartículas correspondientes de quarks y leptones.

Las partículas encanto tienen tiempos de vida del orden de un picosegundo (10^{-12} segundos). Una de estas partículas, desprendida en una colisión de alta energía, generalmente recorrerá unos pocos milímetros, dependiendo de su energía y tipo, y se desintegrará en varias otras partículas. El punto en el que se produce y libera la partícula se denomina vértice primario, y vértice secundario aquel en el que se desintegra. Distinguir el vértice secundario del primario es uno de los requisitos esenciales para la detección de este tipo de partículas y la medición de sus propiedades.

Para hallar los vértices se rastrean las trayectorias de las partículas emergentes de una colisión mediante unos detectores colocados cerca del punto donde se producen las colisiones. En un típico experimento de colisiones de haces, se disponen varias capas concéntricas de detectores de microcinta de silicio con algunas cámaras de hilo gaseosas en su exterior. Las pistas que registran estos detectores se extrapolan regresivamente hasta la vecindad del vértice primario. Las trayectorias de las partículas originadas en la desintegración de una partícula encanto convergen en un vértice secundario que, si todo ha funcionado bien, será distinto del vértice primario.

Sucede que la precisión exigida para extrapolar las pistas de modo que se mantengan enfocados los diferentes vértices ha de ser muy inferior al tiempo de vida de la partícula multiplicado por la velocidad de la luz. La precisión que requieren las partículas encanto es de unas decenas de micrometros, lo que cae muy bien dentro de las posibilidades de los detectores de microcinta de silicio.

Hay otros dos tipos de partículas con tiempos de vida comparables a los de las partículas encanto. Para el leptón tau, el componente más pesa-



trón y un antielectrón en el centro de los anillos. Como revela la imagen aumentada (*arriba*), uno de los productos de la aniquilación es una partícula que se desintegra en otras partículas en un vértice secundario. A su vez, una de estas partículas se desintegra aún más en un vértice terciario. Sin los datos recogidos por los detectores de microcinta (*abajo*) no podrían reconstruirse las trayectorias con precisión suficiente para discernir los puntos de producción inicial y puntos de desintegración subsiguientes. (El experimento Aleph, en el que participa el autor, constituye uno de los cuatro que operan en el LEP.)

do de los que integran la familia de los leptones, el tiempo de vida es de 0,3 picosegundos. Las partículas fondo, entre ellas el quark fondo, tienen tiempos de vida del orden de 1,5 picosegundos. Los detectores de microcinta son muy adecuados para la detección y el estudio de partículas de este tipo.

La detección de partículas fondo reviste especial interés para la física de altas energías. Se trata de uno de los objetivos esenciales de muchos sistemas de detección por microcintas actuales y en proyecto. Por una parte, se espera que estas partículas se comporten de modo distinto que sus antipartículas correspondientes, por lo que su estudio debería arrojar luz sobre la sutil imperfección que existe en la simetría entre materia y antimateria (llamada por los físicos "violación de la paridad de carga"). Además, las partículas que contienen el quark cima ("partículas cima") se desintegran casi todo el tiempo en partículas fondo. A esto se añade que la partícula de Higgs, si no es de excesiva masa, deberá desintegrarse durante la mayor parte del tiempo en un par de partículas, una fondo y otra antifondo. Vemos, pues, que tres de las investigaciones más acucientes de la física moderna están íntimamente ligadas a las partículas fondo y, por tanto, a los detectores de microcinta.

Una manera eficaz de producir y estudiar partículas fondo es hacer colisionar frontalmente haces energéticos de electrones y antielectrones (positrones), con lo que se generan las partículas Z^0, que luego se desintegran en partículas fondo y antifondo. (Z^0 es uno de los tres "bosones de aforo" que transmiten la fuerza débil que rige la desintegración radiactiva; los otros dos son W^+ y W^-.) Una máquina destinada a este fin es el Gran Colisionador de Electrones-Positrones (LEP), situado en un túnel circular de 27 kilómetros a caballo entre Francia y Suiza, cerca de Ginebra. El LEP forma parte del CERN, el gran laboratorio europeo de física de partículas, y recoge los datos de cuatro experimentos, entre ellos el llamado Aleph, donde trabajamos nosotros junto con otros 400 físicos.

En el centro Aleph, un detector de vértice formado por detectores de microcinta de silicio de doble cara se extiende en dos capas cilíndricas concéntricas en torno del tubo de haces en cuyo interior se halla la región de colisión. Rodeando este detector de vértice se sitúa una gran red de detectores de partículas, que incluye dos cámaras de gas de seguimiento encerradas en un imán superconductor. Este complejo sistema detector se utiliza para identificar y medir las cantidades de movimiento de las partículas que "vuelan" de la zona de colisión siempre que se desintegra una Z^0.

Alrededor del 70 % del tiempo, la Z^0 se desintegra en unos pocos (usualmente dos) "chorros" estrechos de partículas que se alejan de la zona de colisión. En uno de cada cinco episodios de esta clase, aproximadamente, uno de los chorros contendrá una partícula fondo y el otro chorro, una antifondo. Cada partícula fondo recorre por término medio unos po-

cos milímetros antes de desintegrarse, la mayoría de las veces en una partícula encanto y una o varias partículas más.

Merced a sus dispositivos de microcinta de silicio, el detector de vértice de Aleph puede ofrecer una visión amplificada del evento con extraordinaria agudeza. Se enfocan así el vértice primario, donde la Z^0 se desintegra y nace la partícula fondo, y el vértice secundario en el que ésta se desintegra en una partícula encanto. Incluso queda bien manifiesto un vértice terciario en el que esta última partícula se desintegra.

Tan pormenorizada información, recopilada de un gran número de episodios, descubre ciertas propiedades fundamentales de las partículas fondo. Sus tiempos de vida, que nos hablan de las interacciones débiles del quark fondo, se miden a partir de la longitud de desintegración, que es la distancia entre los vértices primario y secundario. Esta misma longitud interviene además en las mediciones de la frecuencia con la que la partícula fondo neutra se convierte en su antipartícula, fascinante ejemplo de la transformación de materia en antimateria.

Los detectores de microcinta de silicio desempeñaron un importante papel en la larga y afortunada búsqueda del quark cima (el de mayor masa de los seis) y serán indispensables para llegar a la partícula "más buscada" de la física de altas energías: el bosón de Higgs. La confirmación de la existencia del quark cima se produjo a principios de marzo de este año en el Laboratorio Nacional del Acelerador Fermi en Batavia, donde el colisionador Tevatrón, actualmente el mayor colisionador de partículas del mundo, estrella protones a 900.000 megaelectronvolts contra antiprotones de la misma energía.

En una reducidísima fracción de las colisiones protón-antiprotón se producen partículas que contienen el quark cima. Casi todas estas partículas cima se desintegran en una partícula fondo y un bosón de aforo con carga (W^+ o W^-). Se utiliza un detector de vértice de silicio para individualizar los episodios en que se producen desintegraciones de partículas fondo, separando así los eventos cima del resto y resaltando notablemente la señal cima.

Aún más esquivo se presenta el bosón de Higgs, en el que se han concentrado más de treinta años de trabajos teóricos y experimentales. Se supone que en él se impregnan con masa los quarks y los leptones cargados, así como los Z^0, W^+ y W^-.

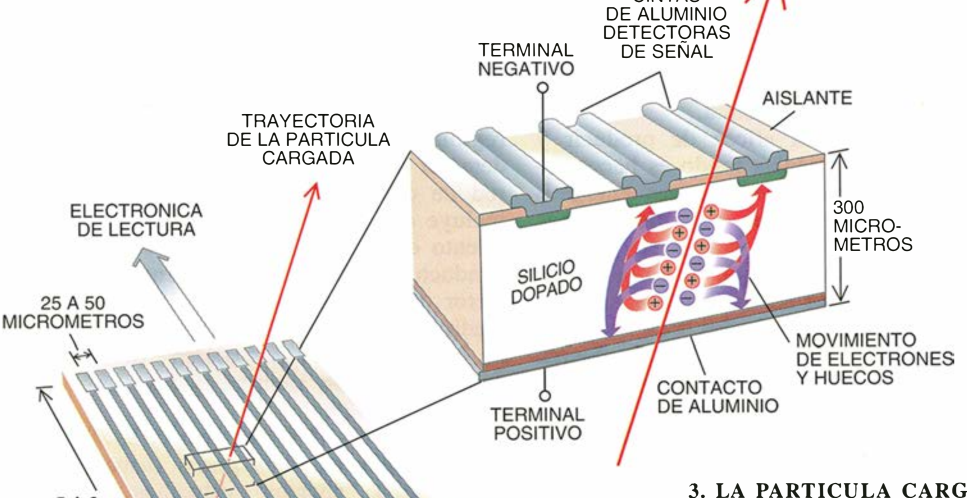
Las pesquisas para encontrar el Higgs en el LEP han resultado hasta ahora infructuosas, indicando que tiene demasiada masa para ser producido a un ritmo detectable con la energía de colisión actual del LEP. La búsqueda, no obstante, se reanudará con renovado vigor cuando la energía del LEP llegue aproximadamente a duplicarse y los investigadores utilicen unos detectores de vértice mejorados para identificar las desintegraciones fondo, características de la partícula buscada.

En último término, puede necesitarse una máquina de energía todavía más elevada. La que reúne más probabilidades de encontrar el Higgs, e incluso nueva física allende el modelo estándar, es el gran colisionador de hadrones (LHC) que va a construir el CERN. Su energía es de unas ocho veces la del tevatrón, y hará colisionar protones contra protones dentro del túnel del LEP, con lo que extenderá la búsqueda del bosón de Higgs a masas varias veces mayores que las detectables con los instrumentos actuales.

Aun con la elevada energía del LHC, los bosones de Higgs serán realmente insólitos. Para compensarlo, los investigadores acelerarán la tasa de interacciones, casi hasta los mil millones por segundo, aunque esa frecuencia contribuirá a dificultar las condiciones experimentales. Los muy raros episodios de interés habrán de ser desenmarañados de una enorme cantidad de desechos, y los detectores y circuitos electrónicos recibirán fuertes dosis de radiación.

En este amenazante entorno, una de las técnicas esenciales será la del detector de microcinta de silicio. Su elevada velocidad y la pequeña separación de los elementos detectores permitirán aislar los episodios procedentes de diferentes colisiones de haces y reconocer los muy escasos rastros importantes que dejan tras de sí. Su alta precisión facilitará una medición exacta de la cantidad de movimiento de las partículas energéticas cargadas a partir de la ligera curvatura que sufre su trayectoria dentro de un campo magnético.

La revolución promovida por los detectores de microcinta de silicio en el seguimiento de precisión empieza a desbordarse sobre otros campos de investigación, muy especialmente la astrofísica y la obtención de imágenes por rayos X. Una interesante posibilidad es la astronomía por rayos gamma asentada en satélite. Hay grupos de la Universidad de Stanford y de otras instituciones que trabajan en el proyecto de un telescopio de silicio de gran superficie por



3. LA PARTICULA CARGADA que atraviesa un detector de microcinta crea una señal en una o varias de las cintas paralelas. Al pasar por el silicio, la partícula genera pares de carga positiva-negativa en un estrecho tubo que sigue su trayectoria. Por efecto del campo eléctrico interno, las cargas negativas o electrones se desplazan con rapidez hacia el electrodo positivo, mientras que las cargas positivas o "huecos" (lugares donde falta un electrón) siguen la dirección opuesta hacia las cintas. El movimiento de los electrones y huecos genera las señales en las cintas inmediatas.

rayos gamma (GLAST, "Gamma Large Area Silicon Telescope"), que podrá ubicar las fuentes galácticas y extragalácticas de rayos gamma con precisión y sensibilidad inéditas.

En dicho telescopio, los detectores de microcinta estarán entretejidos con finas placas de metal que, de modo general, convertirán un rayo gamma entrante de alta energía en un par electrón-positrón. Se rastreará este par en las capas del detector de microcinta, obteniendo así información sobre la dirección del rayo gamma incidente.

Por muy útil que sea, el detector de microcinta no alcanza la perfección. Un detector de doble cara, con sus dos series de cintas independientes y perpendiculares entre sí, no puede por sí mismo localizar más de un impacto a la vez. Una partícula individual genera una señal en cada cara, las cuales pueden asociarse inequívocamente para definir un punto bidimensional. Pero si las partículas son múltiples, también serán múltiples las señales generadas, y ello provocará ambigüedad: una señal de una cara podrá ir asociada con cualquiera de las diversas señales de la otra cara.

Numerosas aplicaciones como la obtención de imágenes por rayos X requieren la localización inequívoca de cada impacto, incluyendo los producidos simultáneamente. Se trabaja intensamente en la creación de los llamados detectores de píxeles (elementos de imagen) dotados de tal capacidad. Uno de ellos es el detector híbrido de píxeles que se desarrolla en el CERN y otro lugar. La pastilla detectora de tales instrumentos se fabrica de modo muy similar a la del detector de cintas, pero en vez de cintas se implanta una red bidimensional de cuadraditos o rectángulos (los píxeles) que suelen tener de 50 a 500 micrometros de lado. Esta pastilla forma emparedado con otra que contiene la correspondiente red de elementos de amplificación y tratamiento de señal, de manera que cada píxel va conectado a uno de aquellos elementos a través de una serie de protuberancias conductoras.

Se ha previsto utilizar detectores de píxeles en las capas más internas de los sistemas de seguimiento de partículas cargadas en los grandes experimentos del LHC. Cerca de la zona de colisión, donde es extrema la densidad de partículas, se logrará un mejor reconocimiento y reconstrucción de trayectorias efectuando las mediciones de puntos en el espacio con la resolución muy fina que permiten los dispositivos de píxeles.

Otra posible utilización de los detectores de píxel, todavía en estado larvario, se encuentra en la radiografía por rayos X para fines médicos, en especial la mamografía. Los rayos X absorbidos en un detector de píxeles generan directamente señales que pueden ser convertidas a imágenes en un formato digital electrónico apto para su visualización inmediata, análisis y almacenamiento en ordenador; podrían así eliminarse los problemas de tiempos de espera y almacenamiento que comporta el uso de películas fotográficas.

Los detectores de microcinta de silicio son un buen ejemplo de una fecunda aunque subestimada asociación. El afán científico por profundizar en la naturaleza suele estimular el desarrollo de nuevas tecnologías y nuevos instrumentos, y a veces conduce a la creación de industrias enteramente nuevas. Estos instrumentos innovadores a su vez impulsarán un nuevo progreso en la ciencia.

El deseo de comprender el átomo condujo, en los años veinte, a la elaboración de la mecánica cuántica. Esta, a su vez, trajo consigo un conocimiento más profundo de la materia de estado sólido, dando lugar a la invención del transistor en 1947. El transistor sentó una base firme para la expansión de la electrónica y la computación automática que entonces se iniciaba; su desarrollo fue la piedra angular de la industria de los semiconductores, cuya tecnología se utiliza hoy para fabricar los detectores de microcinta. Estos dispositivos ayudan a contestar algunas de las preguntas más acuciantes de la física fundamental; valgan como ejemplo la naturaleza del quark cima y del bosón de Higgs.

La ciencia y la tecnología están inextricablemente entretejidas en un tapiz de extraordinaria belleza, cuya lección sería que el todo es muy superior a la mera suma de las partes.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GAMMA LARGE AREA SILICON TELESCOPE (GLAST): APPLYING SILICON STRIP DETECTOR TECHNOLOGY TO THE DETECTION OF GAMMA RAYS IN SPACE. W. B. Atwood en *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 342, n.º 1, páginas 302-307, 15 de marzo de 1994.

HEAVY FLAVOUR PHYSICS AT COLLIDERS WITH SILICON STRIP VERTEX DETECTORS. Andreas S. Schwartz en *Physics Reports*, vol. 238, n.os 1-2, págs. 1-133, marzo de 1994.

Teorías cuánticas de campos topológicas

Mecánica cuántica y topología protagonizan las nuevas relaciones, instauradas en los años ochenta, entre física y matemática. Ese maridaje ha cristalizado en las teorías cuánticas de campos topológicas

J. M. Fernández de Labastida

La física describe las leyes que rigen el universo: observa, analiza y predice los fenómenos que se producen en el mismo. La matemática define, con un lenguaje propio, las construciones mentales y analiza sus relaciones, sin interés aparente por los objetos y los fenómenos del mundo observable. Pero no siempre se ha dado esa tajante división entre física y matemática.

A partir de Galileo, la matemática ha constituido el lenguaje de la física. Más aún. Desde el XVII y hasta el siglo pasado, una y otra ciencia han progresado de la mano. Newton, Leibniz, Euler, Lagrange, Hamilton y Gauss, entre otros, hicieron importantes contribuciones en física y en matemáticas. Newton, por ejemplo, inventó el análisis con el fin de disponer de un instrumento adecuado para describir el movimiento de los cuerpos. Pero, mediado el siglo XIX, las matemáticas se refugian cada vez más en la abstracción pura, y las dos ciencias empiezan a evolucionar por caminos separados.

En el primer tercio del siglo XX aparecen dos grandes teorías físicas: la relatividad y la mecánica cuántica. Ninguna de las dos precisó crear un andamiaje matemático para su descripción. Se sirvieron de estructuras geométricas preexistentes. La teoría de la relatividad se apoyó en el cálculo tensorial; la física cuántica, en la teoría de los espacios de Hilbert. Pese a su origen puramente abstracto, la aplicación de estas matemáticas dio lugar a innumerables predicciones que se observaron luego en la naturaleza.

Se vino siguiendo en ese proceder hasta los años ochenta, en que surge una nueva interrelación, atisbada, sin embargo, ya en los años cuarenta, en los albores de la teoría cuántica de campos. El giro consistirá en que las estructuras del lenguaje de las teorías cuánticas de campos pueden generar y desarrollar nuevos aspectos de la matemática. La topología será la rama principalmente implicada, y corresponderá a las teorías cuánticas de campos topológicas el papel protagonista.

La topología estudia propiedades globales de los conjuntos de puntos que son invariantes bajo deformaciones continuas. Imaginémonos un toro, es decir, la superficie de una rosquilla o de la cámara de un neumático; en ese espacio continuo, la topología se ocupa de las propiedades que lo distinguen de otros conjuntos de puntos, imposibles éstos de deformarse en el toro sin producirse alguna rotura. Una característica topológica del toro es, entre otras, el conjunto de clases de curvas cerradas que existen sobre él; en el toro hay curvas cerradas que no pueden contraerse a un punto; la existencia de dichas curvas es independiente de las deformaciones que experimente el toro.

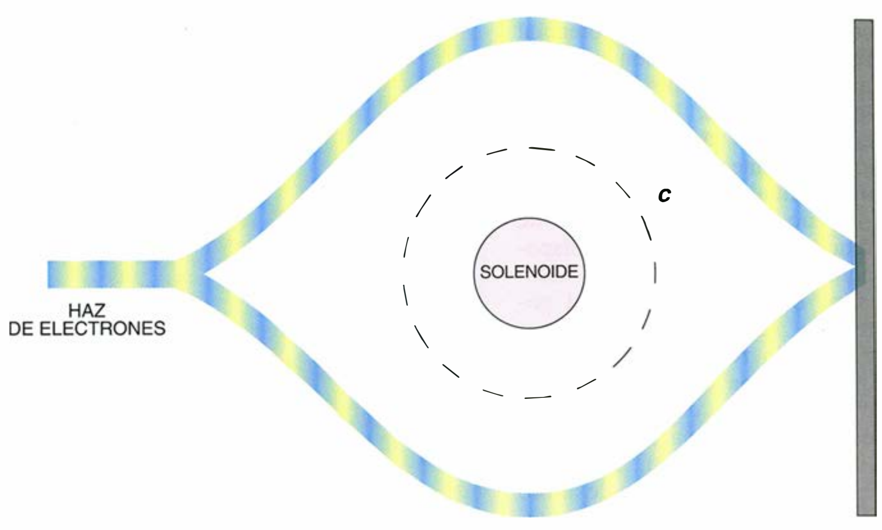
Pero si tomamos la superficie de una esfera, es fácil imaginar que todas las curvas cerradas pueden contraerse a un punto. De ello se infiere que el toro y la esfera son espacios distintos, topológicamente hablando; poseen, al menos, una propiedad global diferente: la existencia de curvas cerradas, sin poder contraerse en el primer caso, aunque sí en el segundo.

Ahora bien, las leyes de la física se definen en un espacio y un tiempo continuos. La física debe recurrir, pues, a un sustrato similar a la topología. Sin embargo, las leyes de la física suelen tener un carácter local, que se contrapone al carácter global de las propiedades topológicas. Parece, por tanto, sorprendente cualquier relación entre la física y la topología.

Pero la hay. El origen de esa relación se remonta a finales de los años cincuenta.

1. LA TOPOLOGIA estudia propiedades globales de los conjuntos de puntos que son invariantes bajo deformaciones continuas. En un toro, la topología investiga las propiedades del mismo que lo diferencian de otros conjuntos de puntos, imposibles éstos de deformarse en el aforo sin producirse alguna rotura. En el toro de la figura se han representado tres tipos de curvas cerradas. La curva A puede deformarse continuamente a un punto y, por tanto, es contráctil. Las curvas *B* y *C* no son contráctiles. La existencia de estas curvas es intrínseca al toro, con independencia de las deformaciones continuas que se hagan del mismo.

JOSE MANUEL FERNANDEZ DE LABASTIDA es catedrático de física teórica en la Universidad de Santiago de Compostela desde 1991. Después de doctorarse en la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook en 1985, trabajó en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton y en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares de Ginebra. Investiga en los aspectos físico-matemáticos de las teorías de supercuerdas y de las teorías cuánticas de campos topológicas.



2. CONFIGURACION EXPERIMENTAL para observar el efecto Aharanov-Bohm. Un haz incidente de electrones se bifurca en dos haces de manera que cada uno pase por de uno de los lados del solenoide colocado perpendicularmente al plano definido por la trayectoria de los electrones (perpendicular al plano de la figura). Las franjas de interferencia detectadas en la pantalla son distintas según circule o no una corriente eléctrica por el solenoide.

Yakir Aharanov y David Bohm propusieron en 1959 un experimento del que se deduce que las propiedades globales del espacio son importantes a la hora de describir procesos de naturaleza cuántica. Aharanov y Bohm predijeron la existencia de un efecto (que desde su observación experimental en 1960 por R. G. Chambers se denomina efecto Aharanov-Bohm) que no tenía análogo en la física clásica. Considérese la situación en que un haz de electrones se bifurca, pasando por ambos lados de un solenoide perpendicular al plano donde esas partículas se propagan, e incide sobre una pantalla. Comparemos las señales producidas por los electrones al colisionar con la pantalla, llamadas franjas de interferencia, cuando por el solenoide circula una corriente eléctrica y cuando no. Observaremos que se produce un desplazamiento de las franjas de inteferencia cuando se conecta el solenoide (*véase la figura 2*).

La física clásica carece de explicación para el efecto Aharanov-Bohm. Ocurre que, si el solenoide es muy largo, crea un flujo de campo magnético a lo largo de la figura, de suerte tal que el campo eléctrico y el magnético son nulos en la zona por donde se propagan los electrones. De acuerdo con las ecuaciones de Maxwell, las ecuaciones clásicas del electromagnetismo, si ambos campos son nulos, las partículas cargadas —los electrones portan carga negativa— no sufren ningún efecto. Afirmación que se ve desmentida por la observación experimental. Para explicar el efecto Aharanov-Bohm hemos de acudir a la física cuántica.

Antes de introducirnos en la descripción cuántica del experimento, conviene recordar que, de acuerdo con las ecuaciones de Maxwell, los campos eléctricos y magnéticos pueden escribirse en términos de potenciales, es decir, en términos de ciertas funciones definidas en el espacio y en el tiempo a partir de las cuales se obtienen dichos campos. La elección de potencial no es única. Esta libertad permite tener infinitas descripciones equivalentes de un fenómeno electromagnético cuando se formula en términos de potenciales.

Para pasar de una descripción a otra, basta con realizar una transformación de aforo ("gauge"), que consiste en modificar los potenciales sumándoles derivadas de funciones arbitrarias. Un sistema como éste, que posee una libertad de elección de potencial, se dice que es un sistema con "simetría de aforo"; cuando se trabaja con una de las infinitas descripciones equivalentes, se opera en un aforo determinado. Esta propiedad de la interacción electromagnética es tan intrínseca, que el electromagnetismo puede caracterizarse como la teoría que posee una simetría de aforo determinada.

Los campos eléctrico y magnético de la zona por donde se propagan los electrones del experimento del solenoide son nulos, se halle o no éste conectado. ¿Quiere ello decir que es posible escoger un sistema de aforo donde los potenciales correspondientes sean cero? La respuesta es afirmativa cuando el solenoide está desconectado; sin embargo, cuando se halla conectado, no puede ser cierto, ya que el flujo magnético a través del mismo no es cero. En virtud de las ecuaciones de Maxwell, si se integra el potencial magnético a lo largo de un círculo en torno al solenoide, el resultado ha de ser proporcional al flujo magnético que atraviesa cualquier superficie bidimensional encerrada por dicho círculo. Cuando el solenoide está conectado, el flujo a través del disco encerrado por el círculo no es cero; el potencial magnético no puede ser nulo en tal situación.

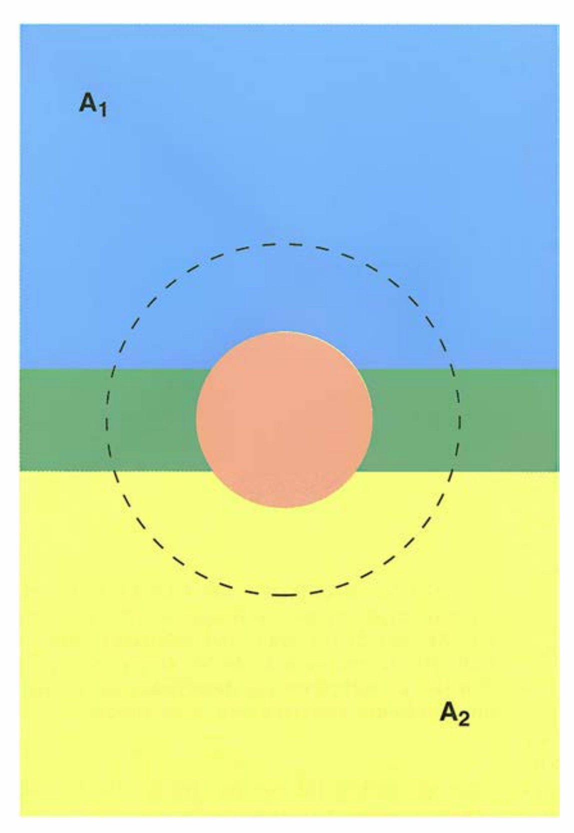
La existencia de la simetría de aforo permite considerar una infinidad de potenciales no nulos tales que los campos eléctricos y magnéticos que originan sean nulos. Estos potenciales diferirán del potencial cero por una transformación de aforo. A estos potenciales se les llama potenciales "de aforo puros"; pueden expresarse como la derivada de una función. Ahora bien, si se toma uno de estos potenciales de aforo puros y se hace la integración a lo largo del círculo que rodea al solenoide, al tratarse de la integral de la derivada de una función a lo largo de un camino cerrado, el resultado es, por definición, cero. Lo que plantea el siguiente problema: ¿podemos diseñar un potencial magnético capaz de reproducir el flujo que atraviesa la superficie encerrada por el círculo?

Existen dos formas de solucionar el problema planteado. La primera consiste en permitir que la función cuya derivada es el potencial no sea de valor único en la zona exterior al solenoide, sino que asigne varios valores a un mismo punto del espacio ("multivaluada"). Permitir funciones multivaluadas constituye una solución coherente, pues hay una zona excluida en el estudio: la ocupada por el solenoide. Si el círculo que rodea a éste pudiera encogerse hasta

constituir un punto, el potencial basado en una función multivaluada sería singular y, por tanto, inadmisible. La integración del potencial magnético descrita anteriormente daría en este caso un resultado distinto de cero.

Si no queremos hacer uso de funciones multivaluadas, disponemos de una segunda solución. Basta suponer que el potencial se halla definido por zonas con regiones comunes, y que la forma del mismo en dichas regiones comunes difiere en una transformación de aforo (*véase la figura 3*). Eligiendo estas transformaciones de aforo adecuadamente, podemos obtener un potencial magnético (o un conjunto de ellos distribuidos por zonas) de suerte que la integral a lo largo del círculo que rodea al solenoide proporcione el flujo magnético a lo largo del mismo.

Ambas soluciones descritas obligan a generalizar la noción de potencial magnético en situaciones donde se presenta alguna región excluida. La exclusión de esta región es una propiedad topológica del espacio que se considera. Existen curvas cerradas en dicho espacio que no pueden contraerse continuamente a un punto; lo vimos en la curva que rodea al solenoide. Esa generalización del potencial magnético la conocían ya los matemáticos mucho antes de que Aharanov y Bohm avanzaran su propuesta. Se trata de la teoría de fibrados principales que, como caso particular, estudia las configuraciones de potenciales electromagnéticos sobre espacios de topología arbitraria.



3. CONFIGURACION de un potencial magnético con una región excluida: la zona sombreada que corresponde al solenoide (*centro*). El potencial magnético no está definido globalmente, pero sí en cada una de las zonas 1 (*azul*) y 2 (*amarilla*). En dichas zonas toma la forma A_1 y A_2 respectivamente. En la zona común (*verde*) los potenciales magnéticos se diferencian en una transformación de aforo.

La descripción clásica de la configuración del campo electromagnético que se ha realizado no permite explicar el efecto Aharanov-Bohm. En física clásica, las partículas dotadas de carga sólo sienten los campos eléctrico y magnético, pero no los potenciales. En física cuántica, sin embargo, la evolución del haz de electrones viene gobernada por el potencial electromagnético. La descripción cuántica de un haz de electrones se hace mediante ondas cuya longitud es inversamente proporcional al momento de los electrones y cuya frecuencia es proporcional a la energía. La función de onda correspondiente asigna, en cada instante, cierta altura a cada punto del espacio, de manera muy similar a las ondas que se producen en la superficie de un estanque. Dicha altura varía periódicamente entre un valor máximo y un valor mínimo, variación que halla su expresión matemática en una función sinusoidal cuyo argumento es un ángulo que se denomina fase. La fase depende de la posición y del tiempo, y así la función sinusoidal asigna una altura a cada punto del espacio en cada instante. En física cuántica, el valor del máximo de la onda asociada al electrón nos indica la probabilidad de encontrar el electrón en un determinado punto del espacio en un instante dado. Dicha probabilidad, independiente de la fase, permanece invariante, aun cuando se modifique la fase asociada a la onda del electrón de forma arbitraria en cada punto del espacio.

En física cuántica, las fases globales no producen ningún efecto observable. Pero las fases relativas sí originan fenómenos de interferencia: una diferencia de fase en los haces que se superponen en la pantalla genera un cambio en el máximo de la onda del electrón, provocando una modificación de la probabilidad. Las franjas de interferencia observadas en la pantalla representan los máximos y mínimos de probabilidad asociados al haz resultante en un determinado plano del espacio. Cualquier cambio en la fase de uno de los haces ejerce un efecto observable, que se manifiesta por un desplazamiento de las franjas de interferencia.

La propagación de los electrones del experimento propuesto por Aharanov y Bohm halla su expresión matemática en una ecuación donde aparece el potencial magnético. La ecuación presenta invariancia de aforo; es decir, si el potencial magnético escogido se sustituye por otro resultante de una transformación de aforo del primero, la función de onda del segundo difiere, en una fase, de la función de onda que estaba asociada al primer potencial magnético. En física cuántica, dos funciones de onda que difieren en una fase son equivalentes y, por tanto, se respeta la simetría de aforo.

Sabemos que la forma del potencial magnético en la situación experimental correspondiente al efecto Aharanov-Bohm tiene funciones distintas en cada una de las zonas alrededor del solenoide (*véase la figura 3*). Esto significa que, si se hace una transformación de aforo en cada zona, con el propósito de trabajar allí donde el potencial magnético se anula, la función de onda adquiere una fase que es distinta según que el electrón haya pasado por uno u otro lado del solenoide. El resultado es la superposición de funciones de onda que originan franjas de interferencia desplazadas respecto a las que se producen cuando el solenoide no está conectado. Los cálculos de este análisis demuestran que el desplazamiento de las franjas de interferencia es proporcional al flujo magnético que atraviesa el solenoide e independiente de la extensión de éste. Lo que se observa experimentalmente está en completo acuerdo con la explicación cuántica del proceso.

Del efecto Aharanov-Bohm se obtienen dos conclusiones que marcan la pauta de la relación entre física cuántica y topología. Por un lado, la conveniencia de generalizar conceptos físicos en situaciones donde la topología del espacio no es sencilla; dicho con precisión técnica, el potencial electromagnético corresponde a una conexión de un fibrado principal. Por otro lado, la física cuántica conduce a consecuencias observables

gracias a las características topológicas del espacio; para un flujo magnético dado, el desplazamiento de las franjas de interferencia en el efecto Aharanov-Bohm es independiente de la extensión de la zona excluida, siempre que ésta no sea nula, o lo que es lo mismo, la topología del espacio es la responsable de que se observe dicho desplazamiento.

Tras el descubrimiento del efecto Aharanov-Bohm, la incidencia de la topología y de la geometría diferencial en el avance de la física ha sido determinante, desde los monopolos magnéticos hasta la teoría de cuerdas. El modelo estándar de la física que describe tres de las interacciones fundamentales de la naturaleza —fuerte, débil y electromagnética— está formulado en términos de "teoría de aforo", una generalización del electromagnetismo. Las teorías de aforo generalizan la simetría de aforo antes expuesta. Esta generalización asocia un grupo a dicha simetría.

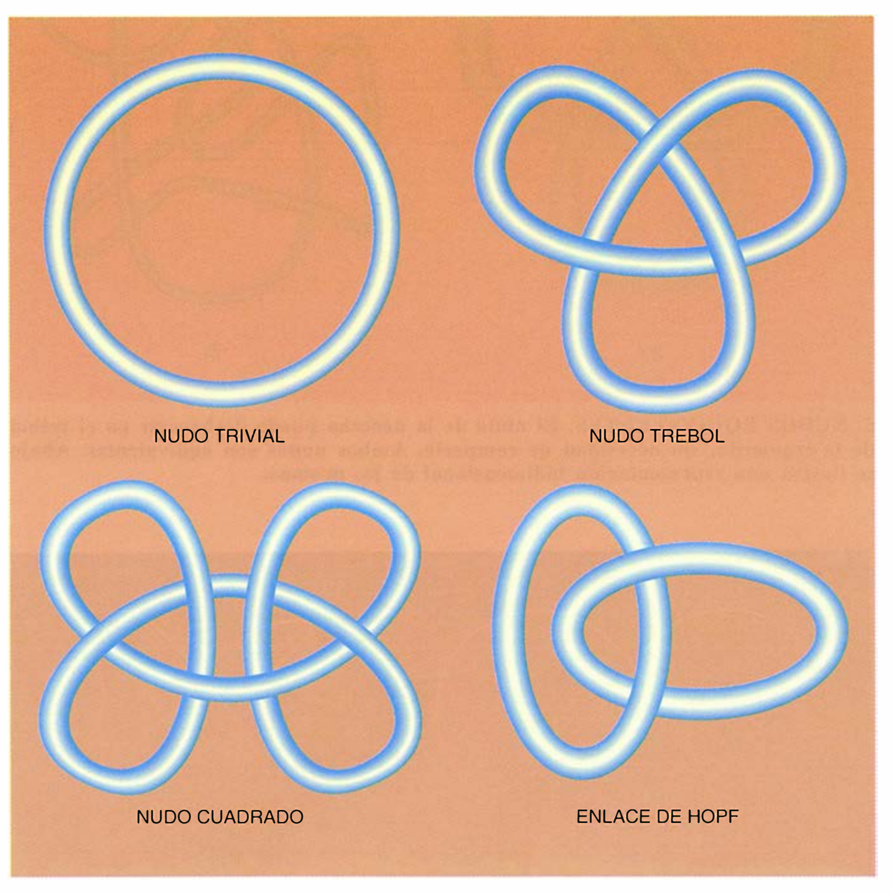
La cuarta de las fuerzas fundamentales, la interacción gravitatoria, se ha resistido todavía a una descripción cuántica. La formulación clásica de la gravedad puede entenderse también como una teoría de aforo. Pero su formulación cuántica constituye uno de los grandes problemas a los que se enfrenta la física teórica. Para resolverlo se han abierto dos vías de investigación: la revisión de los métodos de estudio de la teoría cuántica de campos y la profundización del estudio de las teorías de cuerdas y de supercuerdas. Si la solución se hallara escondida en la segunda vía, tendríamos un marco unificado de las cuatro interacciones fundamentales. Quizá la raíz última de la dificultad estriba en que no se dispone de las estructuras matemáticas adecuadas.

Una nueva relación entre física y matemática comenzó en 1982 con la reformulación de la teoría de Morse realizada por Edward Witten. La teoría de Morse permite obtener información sobre las propiedades topológicas de conjuntos de puntos mediante el estudio de los puntos críticos de funciones definidas sobre dichos conjuntos. Witten reformuló y generalizó la teoría de Morse haciendo uso de las teorías cuánticas de campos supersimétricas bidimensionales, que se caracterizan por una propiedad: su espectro está dividido en multipletes que contienen igual número de fermiones (protones y electrones) que de bosones (fotones), todos ellos con la misma masa. Los modelos supersimétricos bidimensionales más generales son los llamados modelos sigma, que relacionan el espacio bidimensional con un espacio arbitrario donde se hallan inmersos.

En sus trabajos, Witten descubrió que, en la teoría cuántica de campos correspondiente a los modelos sigma supersimétricos, existían cantidades observables (de naturaleza física), que eran independientes de las deformaciones continuas del espacio considerado. Los modelos sigma supersimétricos no sólo permiten calcular cantidades observables, sino, además, "demostrar" que son invariantes topológicos. (Llámase invariante topológico a un factor de normalización, o multiplicativo arbitrario.) Este "demostrar" debe entenderse en el marco de la teoría cuántica de campos, basada en la validez de un objeto denominado integral funcional, carente todavía de una definición matemática rigurosa; por ello, cualquier resultado fundado en ese objeto no puede afirmarse que esté demostrado en sentido estricto.

Witten perfeccionó en 1982 la teoría de Morse con la ayuda de las teorías cuánticas de campos supersimétricas. La teoría de Morse-Witten permite convertir las desigualdades clásicas de la teoría de Morse en igualdades, siendo por tanto sus resultados mucho más poderosos. Sin embargo, la teoría refinada, en comparación con la ordinaria, posee un grado de complejidad mayor a efectos de cálculo. Trabajos posteriores han definido esta teoría fuera del marco de la teoría cuántica de campos dotándola del rigor matemático adecuado. En 1988, Witten acotó los ingredientes esenciales de las teorías cuánticas de campos supersimétricas en su conexión con la topología, construyendo las teorías cuánticas de campos topológicas.

En la década de los ochenta, el estudio de la estructura topológica de espacios de tres y cuatro dimensiones fue muy fructífero. Los dos ejemplos más representativos son la formulación de los invariantes de S. Donaldson para los espacios de cuatro dimensiones, y de los polino-



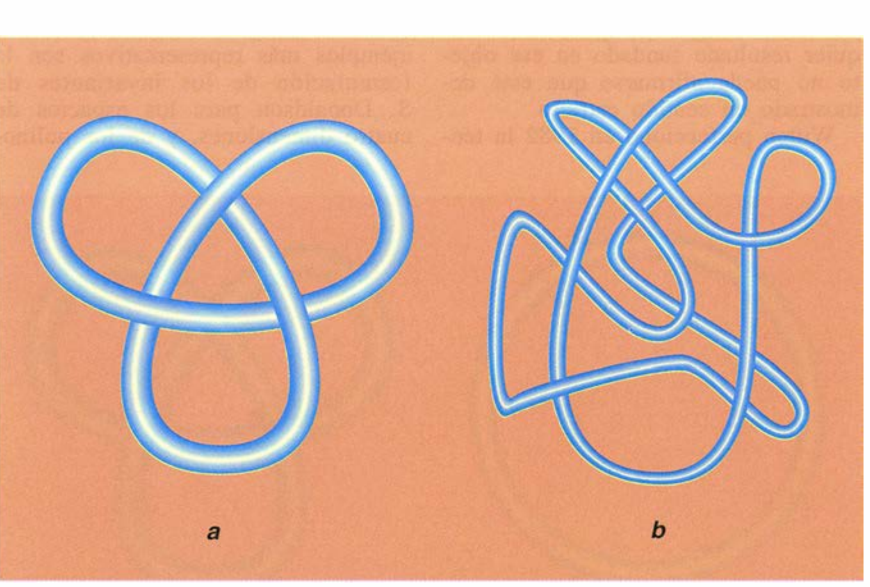
4. NUDOS Y ENLACES. Un nudo consiste en una curva cerrada, que comienza y termina en el mismo punto del espacio y que no posee ninguna autointersección. Llamamos enlaces a la serie de curvas cerradas dispuestas de tal manera que no intersecan ni entre sí, ni consigo mismas. Cada curva constituye una componente del enlace y, por sí sola, corresponde a un nudo. Un nudo viene a ser, pues, un enlace de una sola componente. Se ilustran diversos ejemplos. Los tres nudos no son equivalentes, ya que para transformar uno en cualquiera de los otros dos es preciso romperlo. El enlace de Hopf es el más sencillo de los enlaces de dos componentes.

mios de V.F.R Jones para los de tres dimensiones.

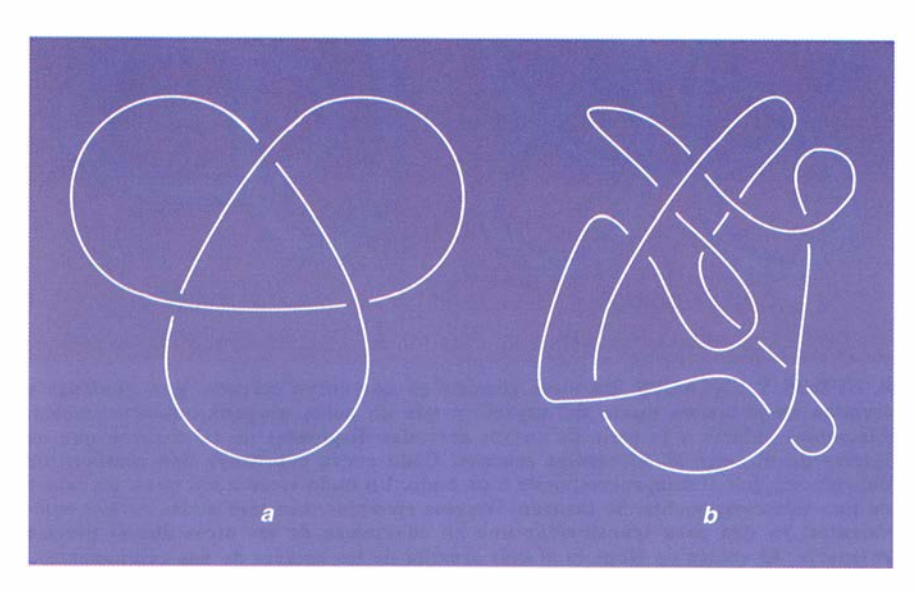
La teoría cuántica de campos topológica que ha abierto nuevos horizontes en el estudio de las propiedades topológicas de los espacios en tres dimensiones se conoce por teoría de aforo de Chern-Simons. Las cantidades naturales u observables que aborda se relacionan con los nudos.

Un nudo consiste en una curva cerrada, es decir, una curva que comienza y termina en el mismo punto del espacio; no posee ninguna autointersección. A partir de una serie de nudos podemos construir el concepto, más general, de enlace. Un enlace consiste en una serie de curvas cerradas dispuestas de tal manera que no intersecan ni entre sí, ni consigo mismas. Cada curva constituye una componente del enlace y, por sí sola, corresponde a un nudo. Un nudo puede considerarse, por tanto, como un enlace de una sola componente.

El nudo trivial, el trébol y el nudo cuadrado constituyen ejemplos de enlaces de una sola componente; el enlace de Hopf posee dos componentes (*véase la figura 4*). El trébol y el nudo cuadrado están "anudados" mientras que el nudo trivial no lo está. La noción de estar anudado no es una noción intrínseca de la curva que constituye el nudo, sino de la forma que toma la curva en el espacio tridimensional. De hecho, la noción de estar anudado sólo tiene sentido en espacios de tres dimensiones. En los espacios bidimensionales no hay posibilidad de anudar. En los cuadridimensionales es posible deshacer el nudo a través de la cuarta dimensión.



5. NUDOS EQUIVALENTES. El nudo de la derecha puede deshacerse en el trébol de la izquierda, sin necesidad de romperlo. Ambos nudos son equivalentes. Abajo se ilustra una representación bidimensional de los mismos.



El interés por la teoría de enlaces se remonta al siglo XIX. William Thomson (lord Kelvin) se propuso ya explicar la estructura de la tabla periódica de los elementos a partir de la asociación de un nudo a cada tipo de átomo. Aunque desechada muy pronto, la idea se convirtió en el primer intento de clasificar los enlaces. En 1900 Peter G. Tait publicó la primera tabla relacionada con la clasificación de los enlaces y esbozó una serie de conjeturas que, en algunos casos, han tenido que esperar más de 80 años para su demostración o rechazo. Pese a los avances registrados, la clasificación de los enlaces sigue siendo un problema abierto.

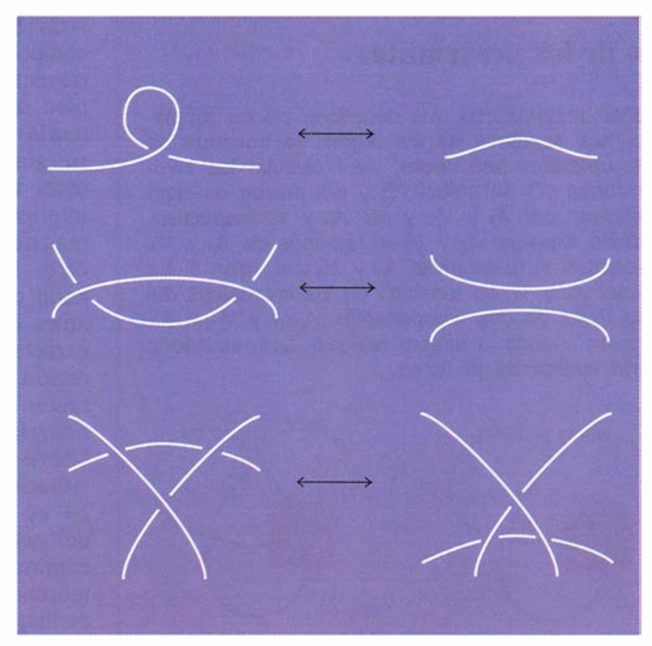
Pero, ¿qué se entiende por clasificación de los enlaces? La clasificación consiste en enumerar todos los posibles enlaces no equivalentes que permitan deformaciones sin rotura. Para acometer esta clasificación hemos de disponer de un criterio que nos diga cuándo dos enlaces son equivalentes y cuándo no: dos enlaces son equivalentes si uno de ellos puede deformarse en el otro sin que se produzca rotura. Si se asocia a un enlace una cantidad que sea invariante bajo la equivalencia citada, se dispondrá de una herramienta muy útil. Si dicha cantidad es distinta para dos enlaces, tales enlaces no serán equivalentes. Ahora bien, si dicha cantidad es la misma, no se podrá concluir nada sobre ellos.

Asociando a los enlaces cantidades invariantes se avanza hacia la clasificación; se progresa, en particular, obteniendo cantidades invariantes que sean cada vez más "finas", es decir, capaces de distinguir más enlaces. La primera cantidad invariante de este tipo, descubierta en 1928, recibe el nombre de polinomio de Alexander, en honor de James W. Alexander. Este polinomio se simboliza por $A_K(t)$ y se construye de acuerdo con los números de cruces de los nudos.

Una segunda cantidad invariante del tipo descrito fue construida por V. F. R. Jones en 1984: el polinomio de Jones, $V(t)$, una cantidad bastante más fina que el polinomio de Alexander. Jones descubrió su polinomio en las investigaciones que llevó a cabo sobre ciertas estructuras matemáticas que aparecen de forma natural en física estadística. Los polinomios de Jones fueron redescubiertos por Witten unos años más tarde utilizando las teorías cuánticas de campos topológicas. El resultado permite una generalización de dichos polinomios, no sólo porque se obtienen

cantidades invariantes más finas, sino también porque pueden definirse en espacios tridimensionales arbitrarios (los polinomios de Jones fueron originalmente definidos para espacios no curvados).

Para comprender la conveniencia de introducir las cantidades invariantes, importa antes conocer la representación de los enlaces. Dos enlaces aparentemente distintos serán equivalentes (*véase la figura 5*) si cumplen la condición de que uno se deforme en otro sin romperse. Los enlaces suelen representarse por un diagrama bidimensional (*véase la figura 5 abajo*). Un mismo nudo o enlace puede representarse por diagramas distintos, por lo que se precisa establecer una serie de movimientos en los diagramas de enlaces de tal forma que, mediante ellos, dos diagramas del mismo enlace puedan representarse de la misma forma.



6. MOVIMIENTOS DE REIDEMEISTER. En los años veinte, Kurt Reidemeister simplificó el estudio de los nudos mediante la introducción de movimientos bidimensionales en los diagramas de los nudos y los enlaces. En efecto, a través de esos movimientos los diagramas de nudos y enlaces equivalentes poseen diagramas que pueden transformarse entre sí. Apoyándonos en ellos podemos transformar uno de los nudos presentados en la figura 5 abajo en el otro.

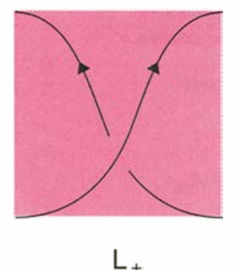
K. Reidemeister introdujo en 1920 los movimientos que llevan su nombre (*véase la figura 6*) y demostró que dos diagramas de enlaces corresponden al mismo enlace en el caso exclusivo de que uno pueda transformarse en el otro por medio de una combinación de dichos movimientos. Aunque el teorema de Reidemeister reduce el problema de la clasificación de los enlaces a un problema bidimensional, ello no supone una gran simplificación ya que los movimientos de Reidemeister se pueden aplicar de infinitas maneras.

Existen varios métodos para calcular los polinomios invariantes. Uno de ellos es el basado en las "reglas de trenzado". Supongamos que se tienen tres enlaces orientados (por orientado se entiende que se ha asociado a cada componente una flecha que denota la forma en que se recorre la componente) que denominaremos: L_+, L_- y L_0, y cuyos diagramas son idénticos salvo en cierta zona (*figura 7*). Si denotamos los polinomios invariantes de Alexander y de Jones asociados a un enlace N por A_N y V_N respectivamente, las reglas de trenzado establecen la relación entre los polinomios invariantes indicada en dicha figura. Esas reglas, conocidas como las reglas de trenzado de Alexander-Conway y las de Jones, determinan los polinomios de Alexander y los de Jones, salvo por un factor de normalización. En dichas reglas, t es un parámetro que constituye la variable del polinomio resultante. La normalización más extendida es aquella en la que, para el nudo trivial, tanto el polinomio de Alexander como el de Jones tienen valor 1. Normalización que no siempre es la más conveniente.

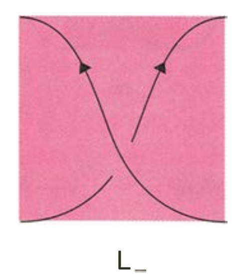
De los dos polinomios descritos, el de Jones es más fino que el de Alexander, puesto que el primero es capaz de distinguir enlaces que poseen el mismo polinomio del segundo. Así, los enlaces que están relacionados por una reflexión especular poseen el mismo polinomio de Alexander. Sin embargo, dichos enlaces suelen presentar, en general, polinomios de Jones diferentes.

La teoría cuántica de campos topológica relacionada con la teoría de nudos y enlaces es la teoría de aforo de Chern-Simons, así llamada en honor de S. S. Chern y J. Simons, introductores de la estructura matemática que caracteriza a esta teoría. El elemento fundamental de esta teoría es un campo potencial similar al potencial electromagnético, pese a lo cual existen dos diferencias fundamentales entre dicha teoría y la que describe el potencial magnético. Por una parte, la teoría de aforo de Chern-Simons es tridimensional y no cuadridimensional; por otra, el campo potencial de la teoría de aforo de Chern-Simons es un campo potencial con autointeracción. Esta autointeracción está fijada por una simetría de aforo similar a la mencionada antes, al describir la generalización del electromagnetismo. Igual que éste, la teoría de aforo de Chern-Simons lleva asociado un grupo. La gran variedad de invariantes de nudos y enlaces anunciada se produce al considerar grupos diferentes.

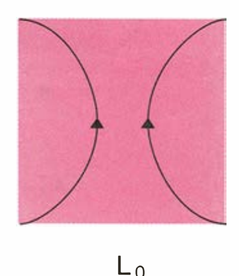
Las dos diferencias descritas fuerzan a que la conducta del campo potencial protagonista en la teoría de aforo de Chern-Simons diverja de la del potencial electromagnético. Dife-



L_+



L_-



L_0

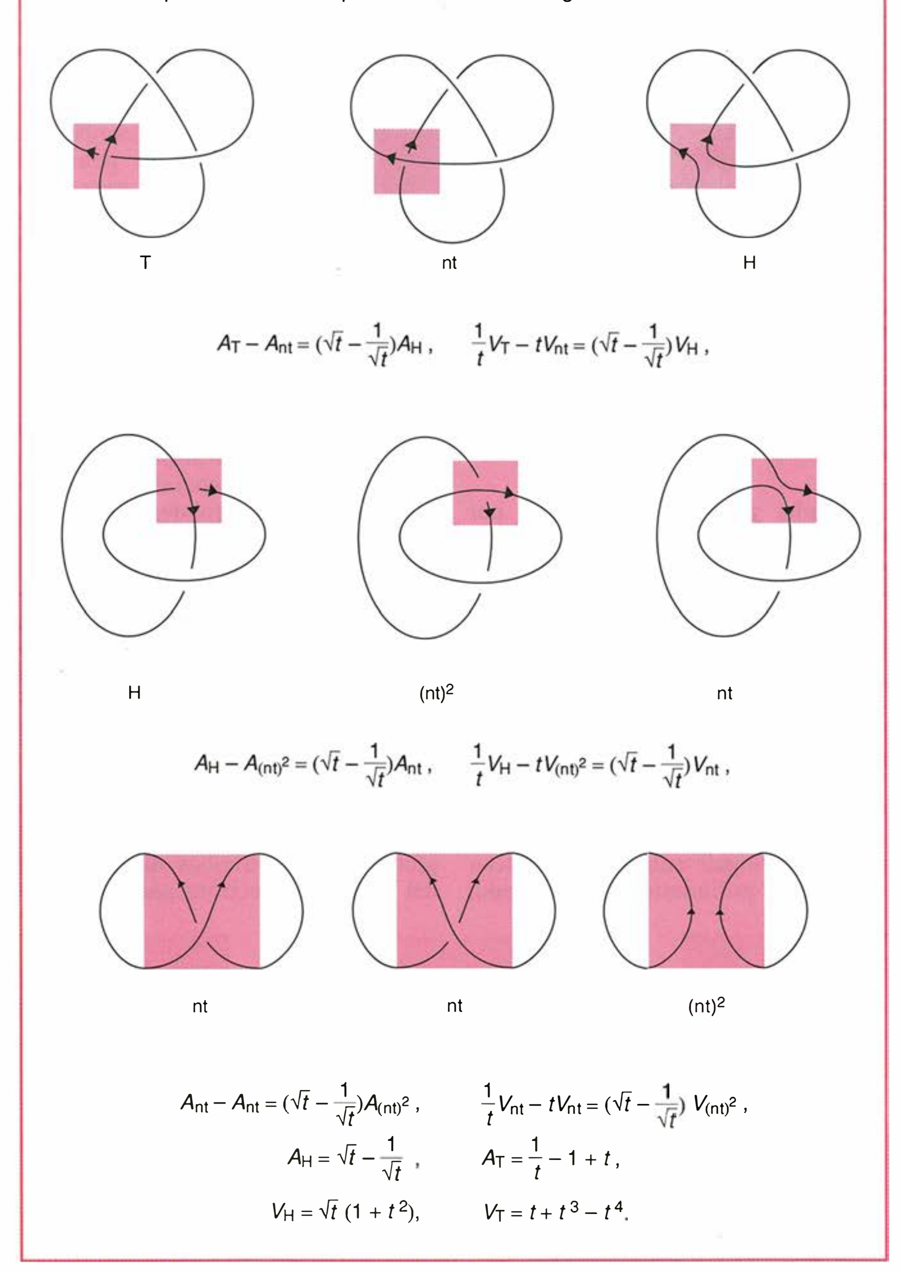
$$\text{Alexander Conway: } A_{L_+} - A_{L_-} = \left(\sqrt{t} - \frac{1}{\sqrt{t}}\right) A_{L_0}\,,$$

$$\text{Jones: } \frac{1}{t}\, V_{L_+} - t V_{L_-} = \left(\sqrt{t} - \frac{1}{\sqrt{t}}\right) V_{L_0}\,.$$

7. REGLAS DE TRENZADO DE ALEXANDER-CONWAY Y DE JONES. Los enlaces L_+, L_- y L_0 son idénticos excepto en la zona sombreada que se indica. Corresponden a un cruce por encima, un cruce por debajo y ausencia de cruce. Las reglas de trenzado relacionan los invariantes correspondientes a enlaces que se diferencian sólo en las zonas indicadas.

Cálculo de los invariantes

Los invariantes son expresiones matemáticas que describen ciertas propiedades de los nudos. Aquí nos servimos de las reglas de trenzado de Alexander-Conway y de Jones, utilizadas tres veces, para calcular los invariantes de Alexander (A) y de Jones (V) del trébol (T) y del enlace de Hopf (H). Dichos invariantes se simbolizan por A_T y V_T, y por A_H y V_H respectivamente. La primera relación permite expresar A_T y V_T en términos de A_H y V_H, y de los invariantes correspondientes al nudo trivial A_{nt} y V_{nt} que valen 1. La segunda relación permite expresar A_H y V_H en términos de los invariantes del nudo trivial y de los del enlace trivial de dos componentes $A_{(nt)^2}$ y $V_{(nt)^2}$. Finalmente, estos últimos se calculan usando la tercera relación. Los resultados finales se presentan en la parte inferior de la figura.



rencias que son, asimismo, responsables de que la teoría de aforo de Chern-Simons sea una teoría cuántica de campos topológica, es decir, de que sus cantidades físicas asociadas correspondan a invariantes topológicos. Para justificarlo, retomemos la situación experimental correspondiente al efecto Aharanov-Bohm.

Consideremos el círculo que rodea al solenoide y la correspondiente integral del potencial magnético a lo largo del mismo. Dicha integral es proporcional al flujo magnético que atraviesa el solenoide, aun cuando el campo magnético a lo largo de la trayectoria del círculo sea nulo. Pues bien, el carácter tridimensional de la teoría de aforo de Chern-Simons y su simetría de aforo la fuerzan a tener unas ecuaciones de campo que implican que el análogo del campo magnético cuadridimensional sea cero. Es decir, la configuración general correspondiente a una teoría de aforo de Chern-Simons presenta unas características similares a la configuración experimental del efecto Aharanov-Bohm. A semejanza de lo que ocurría en éste, en la teoría de Chern-Simons también se presentan situaciones donde el campo magnético es nulo, mientras que la integral del potencial magnético a lo largo de caminos cerrados no es cero. En una teoría de aforo de Chern-Simons el campo potencial puede considerarse de aforo puro.

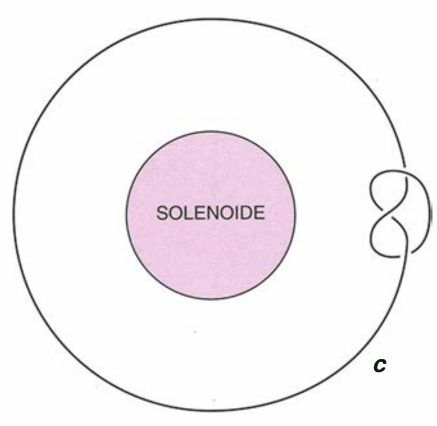
Importa destacar aquí cierta característica en relación con el experimento Aharanov-Bohm. En la descripción que se hizo de la integración del potencial magnético a lo largo de la trayectoria del círculo que rodea al solenoide, no hubo que indicar la situación exacta del círculo respecto al solenoide, ya que su valor es el mismo independientemente de la distancia existente entre ambos. De la nulidad del campo magnético en la zona de integración se sigue que el valor de la integración a lo largo del círculo depende sólo del número de vueltas que la trayectoria de éste dé alrededor del solenoide. Tal integración proporciona también una cantidad de carácter topológico, ya que su valor es independiente de las deformaciones continuas que se hagan del camino de integración.

En la teoría de aforo de Chern-Simons, puesto que el campo magnético es nulo, una integral a lo largo de un camino cerrado origina una cantidad topológica, es decir, una cantidad que no varía si se efectúa una deformación continua del camino. En este sentido, por analogía con lo que sucede en el efecto Aharanov-Bohm, la teoría de aforo de Chern-Simons proporciona invariantes topológicos asociados a caminos cerrados. La cuestión que se plantea ahora es por qué dichos observables no son triviales.

En la teoría de aforo de Chern-Simons no hay materia: no existe un análogo del solenoide utilizado en el experimento del efecto Aharanov-Bohm. Pero si los caminos cerrados no encierran un flujo magnético, ¿por qué no resulta trivial la integración del campo potencial a lo largo

de un camino cerrado que no rodea a un flujo? La respuesta se esconde en la autointeracción, una propiedad de la que carece el potencial magnético, aunque no el campo potencial de la teoría de aforo de Chern-Simons.

Volvamos a la situación correspondiente al efecto Aharanov-Bohm. Imaginemos ahora el círculo como un camino anudado de suerte tal, que lo que rodea al solenoide tiene la forma de un trébol (*véase la figura 8*). Como ya se indicó, la integral del potencial magnético a lo largo de un camino cerrado sólo depende del número de vueltas que éste dé alrededor del solenoide. Esto implica que el valor que se obtiene integrando a lo largo del camino mostrado ahora es el mismo que se tenía en la representación original del experimento. En otras palabras, el nudo asociado a la curva cerrada puede deshacerse sin que ello produzca efecto alguno en el valor de la integración del potencial magnético. Ello se debe a que el campo electromagnético sólo interacciona con la materia cargada; no posee autointeracción. En el efecto Aharanov-Bohm, el solenoide contiene la materia que produce el campo magnético y que es, en definitiva, la responsable de que la integración del potencial magnético a lo largo de un camino que rodea al solenoide origine un resultado distinto de cero.



8. CONFIGURACION en forma de trébol del camino *C* escogido en el experimento del efecto Aharanov-Bohm. El valor de la integral del potencial magnético a lo largo de *C* es el mismo que el obtenido con el camino original en el que no había nudo alguno. El nudo puede "deshacerse" impunemente, ya que el campo electromagnético no posee autointeracción.

En la teoría de aforo de Chern-Simons, el campo potencial posee autointeracción y no es posible deshacer un nudo que cree una configuración como la de la curva representada en la figura 8 sin que se produzca alguna consecuencia. El papel que desempeña el solenoide en el efecto Aharanov-Bohm se representa aquí por el mismo camino de integración, ya que el campo potencial posee autointeracción. La conducta descrita es la responsable de que los enlaces no equivalentes puedan originar valores distintos cuando se integra el potencial vector a lo largo de ellos. Por ejemplo, cuando se recorre el camino asociado al trébol, siempre se está rodeando una parte de ese mismo camino. En cambio, si el nudo es trivial, éste puede configurarase de forma que nunca rodee parte alguna de sí mismo.

La teoría de aforo de Chern-Simons permite definir invariantes de enlaces en diversidad de casos. Amén de emplear grupos distintos, podemos definirlos en espacios tridimensionales arbitrarios, posibilidad que abre nuevas expectativas en la clasificación de los enlaces y el estudio de la topología de los espacios tridimensionales.

Se acaba de abordar también la teoría de aforo de Chern-Simons desde el punto de vista perturbativo. Ello significa que, en vez de perseguir la solución exacta de la teoría cuántica de campos correspondiente, se construye una solución aproximada que se acerca a la exacta orden a orden, es decir, en términos de potencias de una constante que mide la intensidad de la interacción. Lo importante de esta construcción es que las estructuras que aparecen en cada orden proporcionan invariantes numéricos con interpretacion geométrica, característica que solía estar ausente en los invariantes asociados a la teoría de Chern-Simons. Estos invariantes numéricos se hallan encuadrados entre los invariantes de Vassiliev, descubiertos por V. A. Vassiliev a finales de los ochenta, y en cuyo desarrollo hemos participado Marcos Alvarez y yo mismo.

Si tratamos de otras teorías topológicas, importa empezar por distinguir entre las bidimensionales y las cuadridimensionales. Se han obtenido abundantes resultados en el seno de las teorías bidimensionales que se están aprovechando en el estudio de las teorías de cuerdas y de supercuerdas. Las dificultades inherentes de cálculo en el desarrollo de las teorías cuadridimensionales han impedido de momento el rendimiento conseguido con la teoría de aforo de Chern-Simons o las teorías bidimensionales. Una de las teorías topológicas que más incógnitas encierran es la gravedad topológica cuadridimensional, cuya formulación final podría proporcionar estructuras que ni siquiera se sospechan desde un punto de vista matemático.

Hemos insistido en el protagonismo desempeñado por las teorías cuánticas de campos topológicas en la nueva relación entre la física y las matemáticas. El desarrollo de la física teórica había venido utilizando el lenguaje de una matemática preexistente. Este lenguaje había permitido deducir consecuencias cuya verificación experimental instó el diseño de grandes experimentos, a través de los cuales, a su vez, emergieron y crecieron muchas disciplinas dentro de la física y de la ingeniería. En la década de los ochenta se cambian los papeles: las teorías cuánticas de campos topológicas (física) crean un lenguaje que permite obtener muchas consecuencias en el marco de la topología (matemática). Este lenguaje comienza a denominarse "matemáticas teóricas". La demostración rigurosa de las consecuencias que origina constituye el análogo a la verificación experimental aludido anteriormente. El desarrollo ulterior de otras disciplinas de la física y de la ingeniería se corresponderá con el desarrollo que se produzca en las matemáticas encaminado a dotar al nuevo formalismo del rigor adecuado.

Aunque se está en el comienzo de esta nueva forma de evolución, llegan ya los primeros resultados en tal dirección. Quizás en el futuro habrá un nuevo intercambio de papeles, y el nuevo lenguaje matemático, construido a partir de la abstracción física, sea el marco adecuado no sólo para establecer con rigor la teoría cuántica de campos, sino también para establecer los fundamentos de las teorías de cuerdas o de la teoría cuántica de la gravedad. Cualquier adelanto en esos dominios supondría un gran avance en el estudio de la unificación de las cuatro interacciones fundamentales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FIBRADOS Y TEORÍA CUÁNTICA. Herbert J. Bernstein y Anthony V. Phillips en *Investigación y Ciencia*, septiembre de 1981.

TEORÍA DE NUDOS Y MECÁNICA ESTADÍSTICA. Vaughan F. R. Jones en *Investigación y Ciencia*, enero de 1991.

THEORETICAL MATHEMATICS: TOWARDS A CULTURAL SYNTHESIS OF MATHEMATICS AND THEORETICAL PHYSICS. A. Jaffe y F. Quinn en *Bulletin of the American Mathematical Society*, vol. 29, págs. 1-13, 1993.

THE KNOT BOOK. C. C. Adams. W. H. Freeman and Company, Nueva York, 1994.

Conservación del pasado

Arqueólogos y prehistoriadores están multiplicando sus esfuerzos por salvar los monumentos que se hallan bajo la amenaza del desarrollo, la contaminación, los saqueos y el abandono. En el proceso, están transformando los métodos de sus propias disciplinas

Marguerite Holloway



MUROS IMPONENTES del cañón del Chaco, construidos por los indios anasazi hace unos 1000 años en lo que es ahora Nuevo México. Se están derrumbando. Los investigadores están ensayando diversos métodos para proteger el asentamiento de su implacable deterioro. De los resultados obtenidos esperan sacar una lección aprovechable para salvar otros yacimientos que se encuentren en pareja situación. (Fotografía de Stephen Ferry/Gamma Liaison.)



Antes de que el sol se esconda, las piedras de Pueblo Bonito, en el cañón neomexicano del Chaco, refulgen con brillo de oro y sus contornos semejan frisos. Las hoy ruinas fueron antaño ciudad levantada con preciso detalle y habitada por los indios anasazi. Floreció entre el 850 y el 1150 de nuestra era. Van marchándose los últimos turistas del día y el frío de la noche del desierto empieza a enseñorearse de salas y kivas, cámaras ceremoniales circulares éstas que se hunden en el suelo. Respiraderos y puertas ahusadas se tiñen de negro.

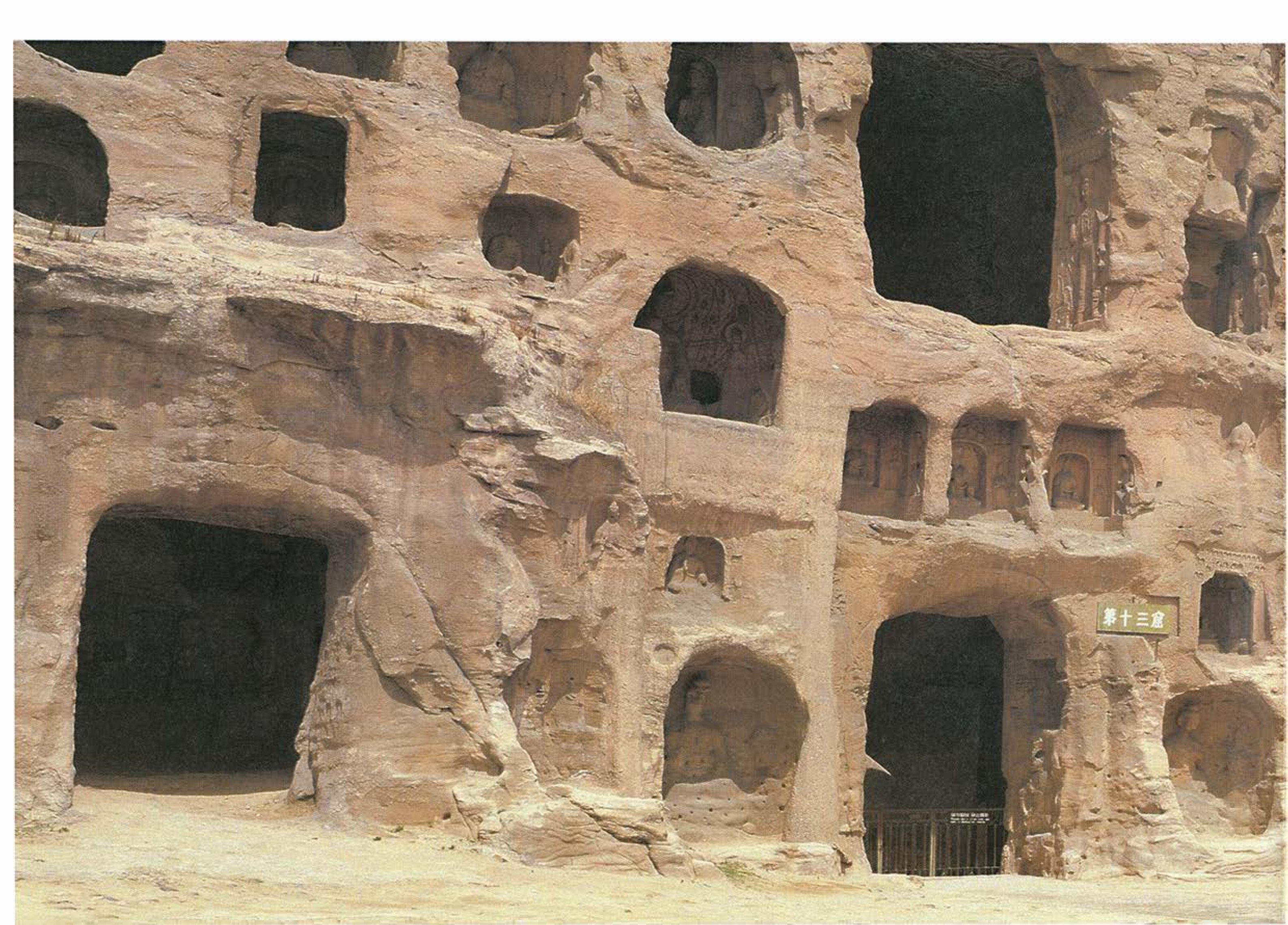
Una de estas entradas (puerta elevada, achaparrada y situada entre dos muros) llamó la atención de Dabney Ford, arqueóloga del Servicio del Parque Nacional que lleva más de diez años investigando en el cañón del Chaco. La entrada está dispuesta de tal forma que capta la luz del sol sólo en el solsticio de invierno. Ese día, los rayos de luz se reflejan en un rincón del muro construido a propósito en el lado opuesto de la estancia. Aunque se conoce bastante mal la cultura anasazi, sostienen algunos que el diseño de Pueblo Bonito (como el de Teotihuacán en México, Machu Picchu en Perú y muchas otras ciudades antiguas) refleja los ciclos astronómicos. La puerta, un ejemplo de arquitectura guiada por los flujos solar y lunar, quizás exprese, además, la estructura política y social jerarquizada de los anasazi.

"Los arquitectos y arqueólogos se han aplicado con ahínco y sin mucho éxito al desentrañamiento de la complejidad de esta sociedad", comenta Ford mientras vamos cruzando portales estrechos y repara en vigas de madera que han sobrevivido intactas durante centenares de años. Pere el cañón del Chaco está desmoronándose.

El poder reinterpretar la cultura anasazi (si se es arqueólogo), visitar el yacimiento (si se es un turista) u orar en las kivas sagradas (si descendemos de la tribu) depende de que los muros no se cuarteen ni desplomen por infiltración del agua en piedras y argamasa. Depende de que se evite la formación de cristales de sal en las piedras que las resquebrajan, de que se impida a los vándalos llevarse los objetos todavía enterrados y a los visitantes encaramarse por paredes y travesaños de madera, haciendo astillas en minutos lo que resistió todo un milenio. Conservar el cañón del Chaco supone resolver una serie de problemas que tienen planteados los yacimientos arqueológicos de todo el mundo.

Los 440 yacimientos considerados por la UNESCO patrimonio de la humanidad —entre ellos, el cañón del Chaco— están amenazados, afirma Bernd von Droste, director del Centro del Patrimonio Mundial de París. Angkor en Camboya, las Pirámides de Egipto, el Partenón de Atenas, la ciudad vieja de Dubrovnik en Croacia, los bajorrelieves orientales de los Palacios Reales de Abomey en Benín y las huellas fósiles de homínidos encontradas por Mary Leakey en Tanzania se cuentan entre los cientos de bienes culturales y antropológicos que corren peligro de desaparecer. "De aquí a veinte años, no habrá más arqueología egipcia que la conservada en los museos", sostiene Fred Wendorf, de la Universidad Metodista del Sur, que ha estado trabajando en Egipto desde 1962. "Lo que quede estará cubierto de agua, roturado por el arado o tapado por el asfalto."

Las principales amenazas que se ciernen sobre los yacimientos arqueológicos coinciden con las esgrimidas



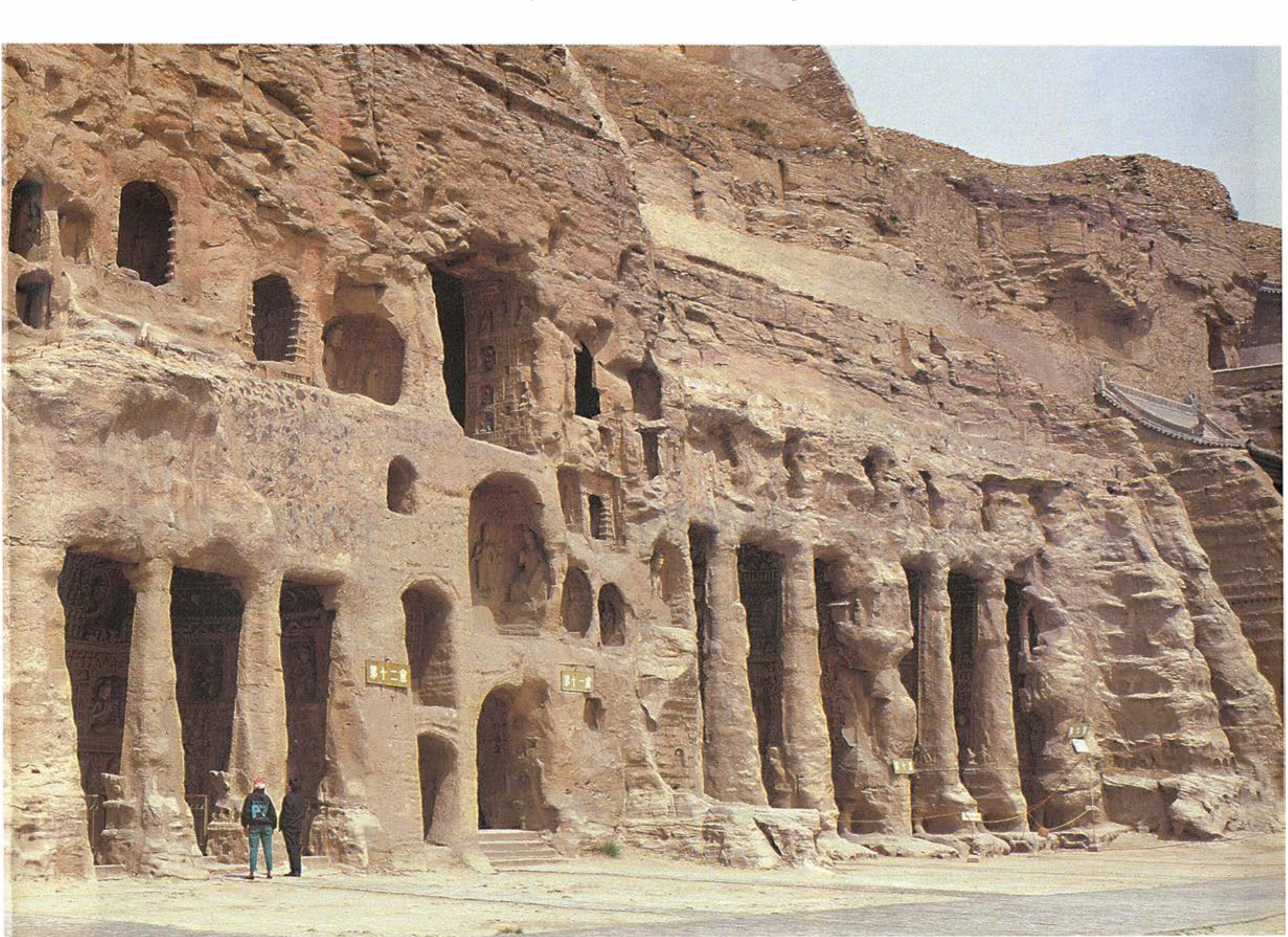
a propósito de la biodiversidad: desarrollo, crecimiento demográfico, turismo, tráfico ilegal, contaminación atmosférica, guerra y abandono, sin olvidar medidas bienintencionadas aunque desastrosas. Pese a ello, los riesgos que acechan al patrimonio cultural mundial no han catalizado campañas populares de la dimensión del movimiento ecologista. Es evidente que los edificios sin techo carecen del gancho emotivo de los ballenatos y que la degradación puede ser un proceso lento que no se aprecie de golpe: para darse cuenta del grado de degradación de una escultura, por ejemplo, hemos de comparar una fotografía actual de la misma con otra tomada hace 50 años.

Dentro de la comunidad arqueológica, sin embargo, ese peligro creciente ha supuesto un replanteamiento de los propios métodos de trabajo. "La actitud habitual del profesional consistía primero en saquear y luego abandonar", reprueba con crudeza Pamela Jerome, de la Universidad de Columbia, y experta en conservación de yacimientos. Los arqueólogos, terminada la campaña de excavación, solían levantar la tienda y volver a sus tareas; en el mejor de los casos, volvían a recubrir las excavaciones. No creían que les competiera la conservación, labor propia de restauradores de los objetos recogidos y responsables de museos. No siempre avanzaban todos a la par: la premura del arqueólogo de campo contrastaba con la dirección técnica de los yacimientos que miraba a más largo plazo.

Pero los arqueólogos de campo se enfrentan ahora a muchos de los retos que han tenido que afrontar siempre los responsables del patrimonio cultural: la desintegración y la pérdida. "Han empezado a ver que el ritmo de destrucción del yacimiento es considerable y que la arqueología es una fuente no renovable. Hay un movimiento hacia la preservación del estado original de los yacimientos", indica Francis P. McManamon, del norteamericano Servicio del Parque Nacional. Además, buena parte de lo recuperado en las campañas realizadas está todavía por investigar. Se calcula que sólo la colección del Servicio de Parques consta de 24,6 millones de objetos, de los cuales 16,8 millones ni siquiera se han catalogado. La ingente cantidad de material que espera en los sótanos polvorientos de los museos de todo el mundo ha llevado a algunos investigadores a pedir la suspensión de nuevas excavaciones. Primero, estúdiese lo que hay, viene a ser la consigna.

Ante los nubarrones que se ciernen sobre objetos y yacimientos, la arqueología responde con un nuevo talante y un reforzamiento de su aparato teórico, que bebe ahora de lo avanzado en el conocimiento sobre conservación de esculturas y pinturas y en ciencias de los materiales. El Instituto de Conservación Getty (ICG) en Marina del Rey, el Centro Internacional para el estudio de la Conservación y la Restauración de la Propiedad Cultural de Roma, el Consejo Internacional sobre Monumentos y Yacimientos de París, la UNESCO, el Fondo de Monumentos Mundiales de Nueva York y diversos laboratorios y universidades están sentando las bases y articulando los principios

1. CUEVAS DE YUNGANG, amenazadas por la contaminación, el árido clima y la filtración del agua. Los expertos trabajan para drenar el agua fuera del yacimiento y construir refugios que protejan las cuevas.



de la nueva disciplina de conservación de yacimientos. Para este año está prevista la aparición de una revista: *Conservation and Management of Archaeological Sites*. En 1996 el Instituto Internacional para la Conservación de Obras Históricas y Artísticas celebrará su congreso dedicado a la conservación arqueológica.

La nueva disciplina se propone, por encima de todo, frenar el deterioro. Las ruinas enterradas sobreviven siglos porque alcanzan el equilibrio con su ambiente estable. Cuando se les retira la arena, se deja crecer una maraña de jungla o se exponen a cielo abierto, empiezan a desmoronarse, desprotegidos contra la agresión del sol, la lluvia, el rocío, el oxígeno y demás elementos, según razona Neville H. Agnew, del ICG. "Se desencadena un torbellino de degradación que actúa de inmediato; a veces se perciben los primeros signos de deterioro a las pocas horas de excavación." Se están investigando estrategias protectoras: cómo rellenar correctamente las ruinas, cómo controlar los cambios de humedad de las cuevas o las tumbas —-posibles responsables del desprendimiento de las pinturas murales—, cómo tratar las piedras de los yacimientos tropicales con biocidas y cómo proteger los edificios de adobe o de barro de los estragos producidos por seísmos.

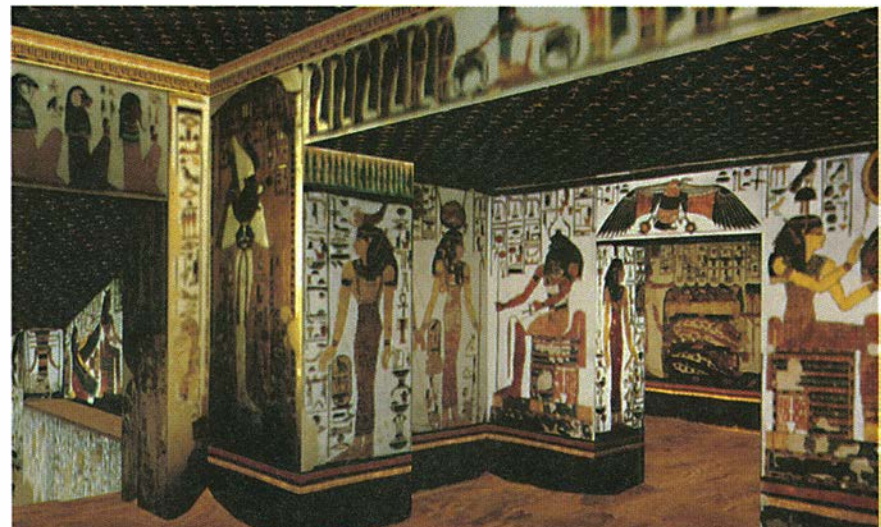
Aun cuando los arqueólogos practicasen ya el relleno de los yacimientos desenterrados, no lo hacían de acuerdo con una técnica estudiada con rigor. Por otra parte, contra el enterramiento se oponen quienes abogan por dejar al descubierto sus yacimientos para que el público, que es quien paga la excavación, pueda recorrerlos. Esta preocupación es evidente en el cañón del Chaco, donde el ICG está colaborando con el Servicio de Parques en un experimento de relleno. Cada año, el asentamiento recibe 80.000 visitantes.

Sin salirnos del Chaco, es obvio que hay que hacer mayores esfuerzos para que Chetro Ketl, una de las principales edificaciones del lugar, no sufra más deterioro. Son harto evidentes los efectos del viento, la lluvia y un fracasado intento de estabilización. La aplicación en los sesenta de cemento al coronamiento de las paredes para aislar la humedad ha terminado por fracturar la piedra subyacente, más ligera. La erosión de la base de los muros los ha desestabilizado hasta el límite del colapso. El agua acumulada en el remate de otras paredes, tras congelarse, ha resquebrajado las piedras subyacentes. El agua también ha causado la eflorescencia salina, o lixiviación, de la estructura. Una vez formados estos cristalitos, crecen o se contraen según la humedad disponible (y cuando crecen, también agrietan las rocas, que acaban por derrumbarse).

Las manchas blancas de sal florecen por doquier en los muros del edificio. De las 60 salas elegidas de Chetro Ketl, sólo se han rellenado 10, porque volver a enterrar el resto costaría unos 18 millones de pesetas, el presupuesto anual para sostén del yacimiento entero. Algunas salas se han rellenado sólo unos pocos metros, instalando sumideros para extraer la humedad de las paredes y sacándola de los yacimientos en zanjas de drenaje. En otros lugares, sumideros enterrados en el centro de las cámaras recogen y evaporan el agua.

Cierta sala con travesaños de madera se ha rellenado con materiales geosintéticos (en este caso, una lámina de plástico nudoso negro, que sujeta firmemente el suelo). Hay que man-

2. TUMBA DE NEFERTARI en Egipto. Contiene pinturas murales que resultaron dañadas cuando se entró en el yacimiento en 1904 (*izquierda*). Para preservar los murales, recién limpiados y protegidos, debería limitarse la entrada a los turistas. Una guía de realidad virtual podría ofrecer a los visitantes una opción alternativa (*abajo*).



tener estable el suelo y eliminar la humedad para evitar la pudrición de la madera vuelta a enterrar. En una kiva cercana se distingue algo parecido a una sonda lunar, enhiesta y desmañada en medio del espacio sagrado, que controla las fluctuaciones de humedad y temperatura. Aunque el proceso experimental no ha terminado, en unas cámaras el sistema parece lograr estabilizar las paredes; en otros lugares, se fracasa porque se desconoce la estrategia adecuada a seguir. Ford se refugia en las limitaciones humanas. "Así es la ciencia, ¿no?"

La verdad es que la ciencia y la técnica de conservación están todavía en mantillas. Cada yacimiento es, además, un mundo. Agnew, de ICG, recuerda que la llamaron para ayudar a conservar las huellas de dinosaurios fosilizadas de Lark Quarry, una región remota de Australia. El umbráculo ideado para proteger las pisadas había servido también de cobijo frente al calor del sol a los canguros, que acabaron congregándose a su sombra y defecando, lo que contribuía poco a conservar las huellas. Si no se tienen los recursos necesarios para mantener una dotación de control (eso acontecía en Lark Quarry), lo mejor es enterrar el yacimiento.

Que es el consejo que se está aplicando a las huellas fósiles de Tanzania, con una antigüedad superior a 3,5 millones de años. En el ICG se está investigando la forma adecuada de cubrir las famosas pistas de Laetoli que establecieron la bipedestación de los homínidos de aquella era. Aunque Leakey tapó el yacimiento con tierra en 1979, las raíces de los árboles han destruido parte de la pista. Por eso, se estudian la filtración del agua en el lugar y su contorno, la conveniencia del uso de biocidas para controlar el crecimiento de maleza y árboles, la señalación del carácter actual de los niveles de tierras y otros materiales para futuros excavadores, la profundidad en que deben quedar las pisadas y los materiales geosintéticos a incorporar.

Otra cuestión importante tiene que ver con el acceso. La Organización de Antigüedades Egipcias está tratando de resolver los problemas que ello plantea en el caso de la tumba de Nefertari, en el Valle de las Reinas. Abierta por primera vez en el año 1904, la tumba de la esposa favorita de Ramsés II alberga magníficas pinturas murales que representan el viaje de Nefertari al más allá. Los lujosos murales rojos, amarillos, blancos y verdes se desestabilizaron durante el descubrimiento y tras la entrada de aire del desierto: el yeso se estropeó y las sales cristalizaron, a veces con un grosor de 2,54 cm, desprendiendo el enlucido de barro y acumulándose a través del pigmento. Temióse que las pinturas no sobrevivieran muchos años. Entre 1988 y 1992 algunas de ellas se desprendieron con sumo cuidado y se limpiaron, volviendo a pegarse las hojuelas de pintura. Los murales se colocaron luego en su sitio.

Los dos últimos años se han dedicado a controlar la humedad y los cambios de temperatura para averiguar la estabilidad del ambiente interno y comprobar si podrían abrirse al público. Shin Maekawa, del ICG, se aprestó a determinar el estado original de la tumba antes de su hallazgo, porque así se habían conservado perfectamente las pinturas a lo largo de unos 3200 años. Demostró que la tumba había estado bastante húmeda durante siglos. Probablemente la humedad había alcanzado el 50 por ciento en los meses de verano.




3. LA DEGRADACION de las esculturas, de 1500 años de antigüedad, resulta evidente al comparar la misma estatua en 1933 (*izquierda*) y en 1991 (*derecha*).

"Hasta entonces, suponíase que, para su conservación, las pinturas murales debían hallarse en un entorno seco, pero no es cierto", explica Maekawa. Lo difícil es mantener estables esos niveles, lo que exige una limitación estricta del número de visitantes. "La tumba tardó tres días en volver a sus condiciones de partida en verano tras el acceso a la misma de un grupo de 20 personas durante media hora." A otras tumbas muy concurridas, como la de Tutankhamon (con señales manifiestas de degradación) acuden hasta 3000 visitantes diarios. El turismo constituye una auténtica plaga para los yacimientos de cualquier parte del globo.

Pero la política se rige por otros principios. El turismo proporciona a Egipto unos 3000 millones de dólares al año. La reapertura de la tumba de Nefertari podría elevar el número de visitantes. Según von Droste, de la UNESCO, en 1994 hubo 500 millones de turistas internacionales; alrededor del 40 por ciento de ellos realizaron viajes "culturales": la Esfinge, los templos mayas de Tikal en Guatemala o la ciudad de Petra en Jordania, entre otros. Por desgracia, se quejan los arqueólogos, el turismo enriquecen más a las agencias de viajes que operan lejos de los países visitados; los ingresos rara vez revierten en la protección del yacimiento. Para paliar ese contrasentido, el ICG y otras instituciones estudian planes viables de gestión del yacimiento (además de planes para los centros históricos de las ciudades) que comprometan a la comunidad, los científicos y el gobierno locales, así como a la industria del turismo.

En algunos casos, las réplicas pueden sustituir los originales y proteger a éstos del contacto con los turistas. Faltó poco para que las pinturas rupestres de Lascaux no se borraran con el roce fortuito de los visitantes. Ante esa situación, el gobierno construyó una réplica en un lugar cercano. Las cuevas originales sólo son accesibles ahora a los estudiosos y la réplica ha ganado tanta fama, que hay que restringir el número de turistas. El ICG e Infobyte desarrollaron una guía de realidad virtual de la tumba de Nefertari (una opción alternativa a la visita del lugar real que bien pudiera generalizarse). Pero estas soluciones carecen de potestad sobre las autoridades del lugar y no resuelven la cuestión de quién tiene derecho a visitar un yacimiento. ¿Debe conservarse aunque nadie pueda verlo?

"Merece la pena salvar los yacimientos, aun cuando nadie pueda entrar salvo los expertos y alguno más", afirma tajante Agnew. "No se trata de caer en el elitismo. El 90



4. ESTACION DE CONTROL situada en una kiva de Chetro Ketl. El dispositivo, diseñado por el Instituto de Conservación Getty, registra los cambios de temperatura y humedad del suelo. Los datos pueden ayudar a los investigadores a determinar cuál es la mejor manera de volver a enterrar las ruinas.

por ciento de los turistas no está interesado en la historia del arte. Vienen mal preparados: entran y salen. Esta gente puede ir a ver otras tumbas egipcias u otros yacimientos que corran peligro. No creo que todo el mundo tenga el inalienable derecho de ver todo lo que quiere ver, como tampoco todo el mundo puede entrar a un concierto de Pavarotti: hay un número limitado de asientos. Esta es la realidad de la vida."

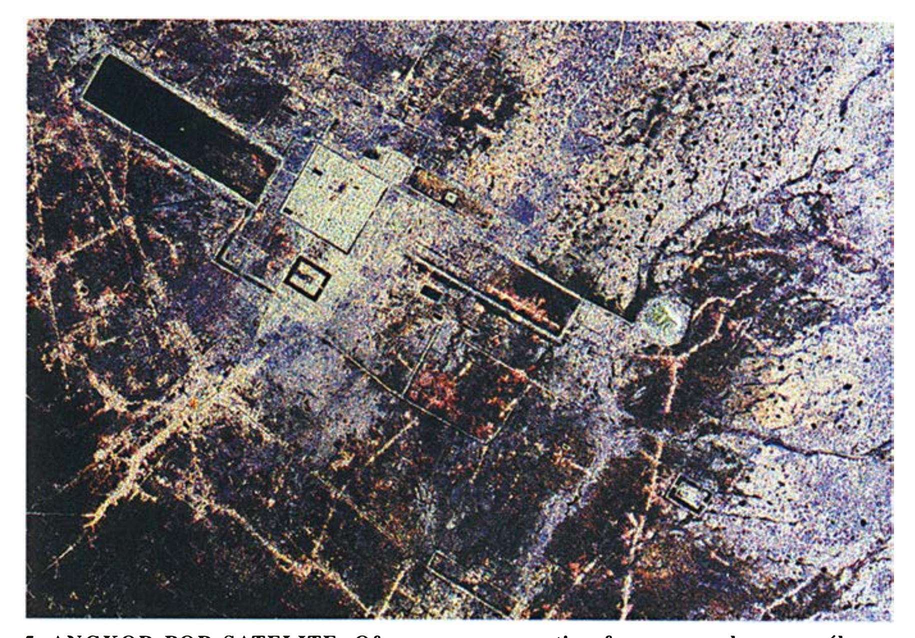
Lo ideal sería extraer la información arqueológica sin remover el yacimiento. En esa dirección, los investigadores se apoyan cada vez más en la detección remota —registro de información con cámaras, radar, magnetómetros—, en resumen, cualquier técnica capaz de aportar a distancia datos del yacimiento. En ese campo labora Farouk El-Baz, director del centro de detección remota de la Universidad de Boston. El equipo de El-Baz ha empleado una de esas técnicas para determinar cómo entraba la humedad en la tumba de Nefertari, así como para extraer aire de una cámara sellada en la base de la Gran Pirámide de Giza y fotografiar el contenido de la sala.

Se ha empleado la detección remota por satélite para cartografiar Angkor en Camboya. El paso siguiente será el de explotar esa información. Angkor fue la capital del imperio khmer desde el siglo noveno hasta el decimoquinto. Dado que cada rey construía una nueva capital, Angkor tiene más de 60 monumentos importantes. El asentamiento está cubierto de vegetación, las rocas han rodado y muchas esculturas están incompletas. Equipos de diversos países trabajan ahora en distintos templos, cada uno de acuerdo con sus métodos y planteamientos propios.

No es fácil conservar monumentos en ambientes tropicales. La jungla se apodera en seguida de todo. Por eso se duda entre emplear biocidas para matar la vegetación o apantallar los yacimientos. Angkor se halla en una región pluviosa. "Tanta agua propiciará el crecimiento vegetal, se haga lo que se haga", se lamenta John Stubbs, de la Fundación de Monumentos del Mundo, que tiene a su cargo el recinto de Preah Khan.

Stubbs descarta el recurso a los biocidas. Ello obliga a su equipo al duro trabajo de arrancar planta a planta, mientras toma nota de las estatuas y practica la anastilosis (es decir, recolocación de las rocas, devolviéndolas del punto donde las encuentran a su presumible posición original). En general, la Fundación de Monumentos del Mundo opta por la no interferencia, una idea cada vez más extendida entre los arqueólogos: no hay que reconstruir ningún edificio, so pena de errar en la interpretación de la estructura original.

De esta medida general, Stubbs salva cierta clase de reconstrucción con la ayuda de la información recabada por la NASA de los satélites artificiales. "Me gustaría restaurar las canalizaciones. Estoy convencido de que la arquitectura dependería mucho de las mismas", sostiene. "Toda la cultura gira en torno al aprovechamiento e ingeniería del agua." La imagen muestra los entrantes del estuario, que inunda la zona desde el río Mekong hasta Angkor durante la estación de las lluvias. La información ayudaría a entender el sistema hidrológico de la región, conocimiento que, a su vez, podría per-



5. ANGKOR POR SATELITE. Ofrece una perspectiva fresca para los arqueólogos que estudian la antigua ciudad khmer de Camboya. El estudio de la vegetación del lugar y su sistema hidrográfico librará, en eso se confía, al yacimiento de su ulterior degradación. Permitirá, además, restaurar los estanques y canales originales.

mitir drenar el yacimiento para su conservación, en caso de que hubiera que hacerlo.

Stubb teme, sobre todo, que el pillaje arrase Angkor. Miedo que comparten otros. "La popularidad del yacimiento, el nuevo acceso, el interés por el arte khmer y la anarquía del lugar son los componentes ideales para el despojo." Al preguntar él mismo en las tiendas de Bangkok por antigüedades khmer, le ofrecieron fotografías de objetos robados en Preah Khan (e incluso fotografías de estatuas que todavía estaban en el yacimiento).

Muchos arqueólogos ven en el pillaje la principal amenaza contra los yacimientos y los objetos antiguos. Aunque no se puede establecer con precisión el valor de los objetos robados, los cálculos los cifran entre 2000 millones y 6000 millones de dólares al año. Del 80 al 90 por ciento de las antigüedades, entre ellas las exhibidas en los museos, proceden de expolios. Rapiña que se intensificó a mediados de los años ochenta, cuando las antigüedades se convirtieron en inversiones seguras, explica Ricardo J. Elia, de la Universidad de Boston.

Con todo, acabar con el tráfico ilícito y aplicar la ciencia y la técnica a la protección de los yacimientos son, en muchos sentidos, tareas más fáciles que resolver la cuestión de fondo, su salvación. Ante la limitación de los recursos, y considerando los conflictos de intereses, ¿qué debería permanecer? "Solía ser el tiempo el que hacía la elección", observa Miguel Angel Corzo, del ICG. "Llegaba la guerra y la gente usaba casas y monumentos abandonados como canteras. Ha sido la pura evolución natural de los acontecimientos la que nos ha traído al punto en que nos encontramos. Pero ahora tenemos una extraordinaria capacidad técnica para salvar lo que queramos. ¿Qué vamos a respetar? ¿Lo dejaremos también en manos del tiempo? O ¿vamos a comportarnos como personas del siglo veintiuno y decidir por qué queremos que nos recuerden?"

La destrucción de un yacimiento aniquila la identidad cultural del que lo erigió. Así ocurre cuando se enfrentan dos grupos étnicos y uno se propone arrasar al otro; se dio, por ejemplo, con la demolición china de los monasterios del Tíbet. La interpretación de los restos arqueológicos conforma la imagen que nos hacemos de un pueblo. Se ha confirmado a propósito del Gran Zimbabwe, una serie de majestuosas estructuras de granito construidas entre el 1400 y el 1600 d.C. Los británicos que trabajaron en la colonia sostenían que el conjunto circular no pudieron construirlo los aborígenes, sino que debieron de ser invasores del norte, procedentes de Grecia, Egipto u Oriente Medio. Se ha establecido, sin embargo, que fueron los antepasados del pueblo shona de la región los que levantaron el Gran Zimbabwe. La identidad cultural y la independencia de Zimbabwe (antigua Rodesia) están estrechamente ligadas a dicho monumento.

Los países africanos en particular podrían perder parte de su identidad cultural si sus yacimientos no se conservan. Escasea el número de arqueólogos nativos, y muchos lugares no se han excavado todavía. Según el informe de 1992 del Banco Mundial sobre cultura y desarrollo en Africa, sólo existe programa arqueológico en 11 países de Africa central, con un presupuesto anual total para la región de unos 2,5 millones de pesetas.

La comunidad arqueológica tiende hoy a adoptar una postura conservacionista. Se aprecia en el reciente descubrimiento de unas 300 pinturas de Cro-Magnon en una cueva próxima a Aviñón. Inmediatamente después del hallazgo, la cueva con sus pinturas de 20.000 años de antigüedad se sellaron. La cueva debe dejarse intacta, y la obligada investigación que ha de empezar no ha de suponer ninguna alteración y sí dejar abierta la posibilidad de rectificaciones en la interpretación para los arqueólogos de mañana.

Por respeto al lugar y al tiempo, los pueblos quieren aferrarse a su pasado. El multiculturalismo —la ponderación de cualquier cultura, por circunscrita que sea— y el sentimiento de que nos acercamos a un nuevo milenio pueden fomentar cierta nostalgia y la necesidad de recuperar la propia historia. Hay, sin embargo, quien opina que carece de sentido el aferrarse a todo. "Nosotros, los occidentales, somos proclives a destacar la importancia de la conservación", comenta Marian A. Kaminitz, del Museo Nacional de los Aborígenes Americanos. Otros "son más partidarios de que las cosas sigan su propio devenir".

En Pueblo Bonito vuelve el desierto. Una quietud absoluta baña las ruinas. "Es bueno que las protejan", dice Petuuche Gilbert, descendiente de los anasazi. Pero también podríamos dejarlas tranquilas, añade: "sería parte del ciclo natural".

Ciencia y empresa

Métodos ópticos no invasivos

En visión y oftalmología

Las partes más accesibles del sistema visual humano son la óptica del ojo y la retina. El desarrollo de instrumentos para estudiar y corregir los defectos de la óptica ocular y de oftalmoscopios, los sistemas para observar la retina, ha despertado un gran interés desde antiguo. Por una razón principal: buena parte de los problemas visuales están relacionados con defectos de la óptica o con patologías en la retina.

El sistema óptico del ojo forma la imagen de la escena visual en la retina. Constituye el primer paso en el sistema visual e impone el límite físico más importante a la percepción visual. Si la calidad de la imagen retiniana es baja, es decir, si las imágenes formadas en la retina están emborronadas, la visión será deficiente, aunque el resto del sistema visual funcione correctamente. En la retina, los fotorreceptores operan una suerte de digitalización de las imágenes al convertir la luz incidente en señales eléctricas. La óptica del ojo, el muestreo y la detección en la retina son las puertas de entrada del sistema visual y establecen un límite fundamental a sus capacidades. Además, por ser las partes más externas, son las más fácilmente accesibles por métodos ópticos no invasivos.

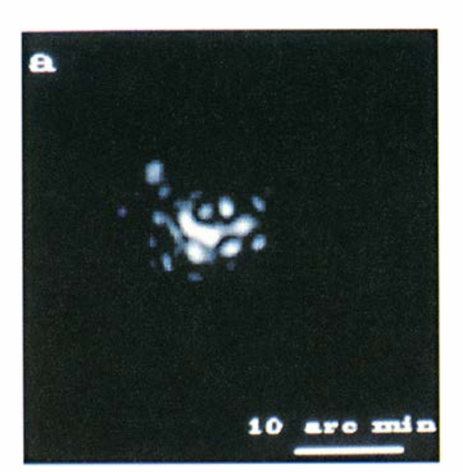
Durante los últimos años, la aplicación de nuevos avances técnicos, apoyados en el uso de láseres y de sistemas más sensibles de registro de imágenes, ha permitido explorar, con finísimo detalle, las partes más externas del sistema visual. Algunos de los instrumentos desarrollados se emplean ya en clínica y cirugía oftalmológicas, como los sistemas de topografía corneal.

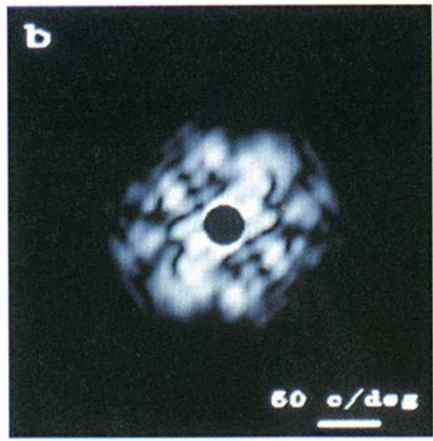
Otra técnica de la que se disponen desde hace algún tiempo versiones comerciales es el oftalmoscopio de barrido láser. Las imágenes del fondo del ojo se obtienen barriendo un punto luminoso sobre la retina y reconstruyéndolas luego por medios electrónicos a velocidad de vídeo. Entre las ventajas del oftalmoscopio de barrido láser se encuentran la posibilidad de obtener imágenes sin necesidad de dilatar la pupila del paciente y la visualización de estructuras retinianas bajo iluminación infrarroja, que no suelen verse en las imágenes oftalmoscópicas tradicionales.

En fase experimental se hallan todavía los sistemas para obtener secciones (imágenes) de la retina mediante técnicas de tomografía óptica coherente, cuyo principio de operación es similar a un escáner con luz. A tenor de los trabajos de investigadores de la Universidad de Viena y del Instituto de Tecnología de Massachusetts, esta técnica parece prometedora en el diagnóstico precoz de enfermedades de la retina y en especial del glaucoma, pues permite detectar ligeras modificaciones de la cabeza del nervio óptico. Otro ejemplo de nuevos sistemas son los oftalmoscopios de alta resolución, que aportan una mejora de la capacidad de ver pequeños detalles en la retina.

En un oftalmoscopio tradicional, la retina se ve a través de los medios oculares. Esto impide que puedan resolverse uno a uno los fotorreceptores de la retina. Piénsese que los conos de la fóvea, zona de la retina que presenta un mayor empaquetamiento de fotorreceptores y la mayor agudeza visual, están separados entre sí unos tres micrometros, distancia muy por encima de la resolución máxima de dicho aparato.

Curiosamente, el problema de observar los fotorreceptores de la retina a través del ojo se asemeja, desde el punto de vista físico, al de distinguir con un telescopio, a través de la atmósfera, una estrella de otra en el firmamento. Debido a esta similitud conceptual, Rafael Navarro y el autor han propuesto oftalmoscopios inspirados en técnicas utilizadas en astronomía y astrofísica. Hay dos siste-





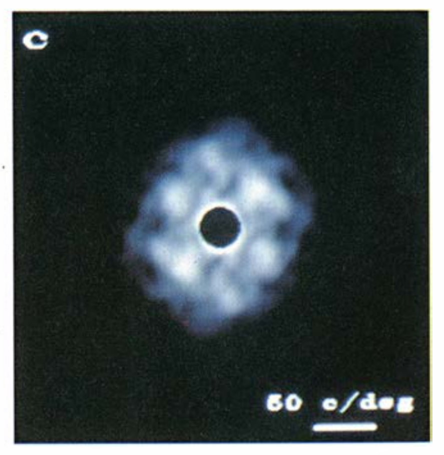
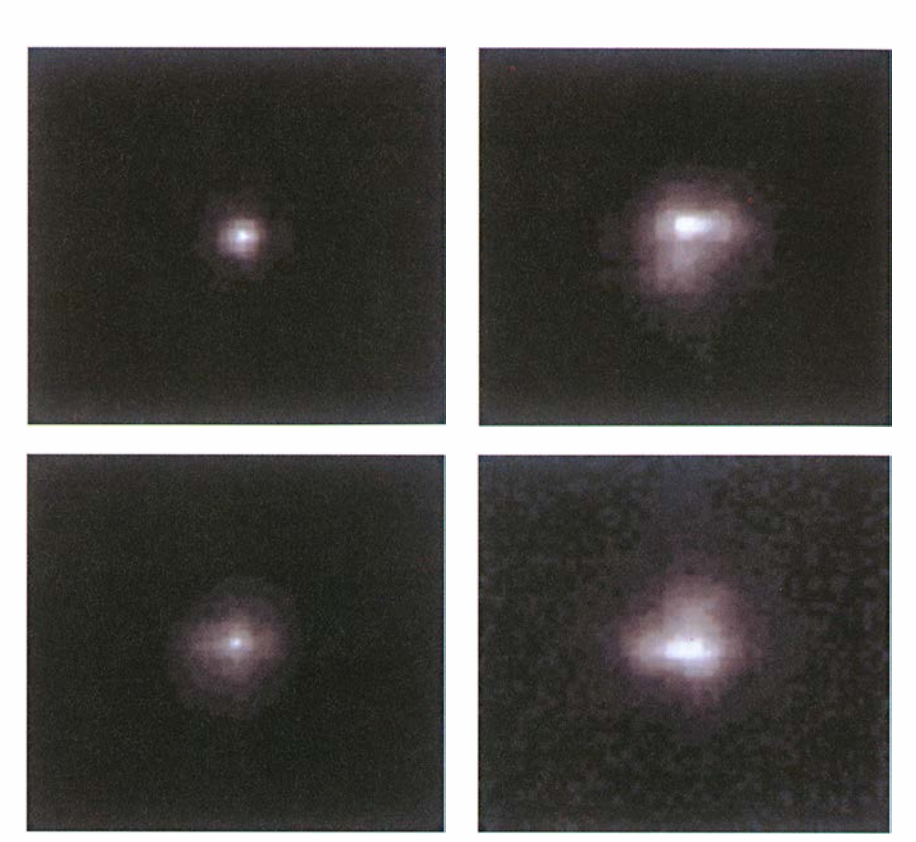


Imagen de corta exposición (coherente) de un pequeño disco luminoso proyectado en la retina a 1 grado de excentricidad (a) *y espectro de potencia de la misma imagen* (b). *El espectro de potencia se obtiene computacionalmente como el módulo al cuadrado de la transformada de Fourier de las imágenes. Del análisis de los espectros de potencias se obtiene información de la separación media entre fotorreceptores y del tipo de empaquetamiento. En* c *se ofrece el promedio de espectros de potencia de varias imágenes diferentes. Puede observarse en esta última figura una distribución de los puntos brillantes en un hexágono que denota que los fotorreceptores de esa zona estarían distribuidos en una red hexagonal bastante regular. (Imágenes obtenidas por Susana Marcos en el Instituto de Optica de Madrid.)*

mas experimentales que están aportando los primeros resultados de imágenes de alta resolución en vivo de fotorreceptores basados en ese enfoque. Mediante luz incoherente el grupo de David Williams, de la Universidad de Rochester, y mediante luz coherente Susana Marcos y Rafael Navarro, del Instituto de Optica de Madrid, en colaboración con el autor, están obteniendo imágenes de conos en zonas de la retina cercanas al centro de la fóvea.

Si se confirman los resultados de estos trabajos, además de su interés como anatomía en vivo de la retina, supondría el primer paso en el desarrollo de aparatos que permitan en el futuro seguir la evolución de la densidad y la distribución de fotorreceptores durante un proceso clínico. En esta línea, una evolución posible de los oftalmoscopios será la utilización de óptica adaptativa para compensar la degradación producida por los medios oculares en el proceso de formación de las imágenes de la retina. Hace algunos años, Josef Bille, de la Universidad de Heildelberg, sugirió esta posibilidad para mejorar un sistema de tomografía de la retina que previamente había desarrollado.



Ejemplos de imágenes retinianas de un punto luminoso obtenidas con diferentes aperturas de entrada y de salida con el sistema experimental del Laboratorio de Optica de la Universidad de Murcia. Puede notarse que con pupilas grandes las imágenes son más extensas y asimétricas

En España, varios grupos de investigación desarrollan su actividad en métodos ópticos aplicados a la visión. Los antecedentes recientes pueden encontrarse a finales de los años setenta, cuando Javier Santamaría comienza a trabajar en óptica fisiológica en el Instituto de Optica de Madrid e inicia algunas de las líneas de varios de los grupos que ahora investigan en ese campo. Entre ellos, el Laboratorio de Optica de la Universidad de Murcia es el de más reciente creación y elabora diversos proyectos en óptica fisiológica dirigidos al estudio básico y aplicado del sistema ocular y al desarrollo de instrumentación. En particular, evaluamos la calidad de la imagen retiniana mediante la aplicación de un sistema experimental que registra la imagen de un punto luminoso en la retina, a partir de cuya imagen se calculan diferentes funciones matemáticas que caracterizan la óptica ocular.

La imagen de un punto en la retina no es otro punto, sino una distribución de luz con una estructura complicada, diferente para cada ojo. A partir de estas imágenes retinianas de un punto se puede simular en el ordenador "cómo es" en la retina la imagen de cualquier test bajo diferentes condiciones. Una aplicación de este sistema es la obtención de estándares de calidad de imagen retiniana en el ojo medio, a través del estudio de la óptica ocular en una población sometida a rigurosos controles oftalmológicos. Estos estándares servirán de referencia en el desarrollo de nuevos diseños en óptica oftálmica, y en especial de lentes intraoculares, que ahora se implantan masivamente en operaciones de cataratas. La calidad de imagen de estas lentes sobrepasa la del cristalino, por lo que podrían desarrollarse nuevas lentes intraoculares más parecidas, en su comportamiento óptico, al cristalino del ojo normal. Las lentes podrían así incorporar otras características útiles; por ejemplo, cierta capacidad de acomodación.

En nuestro laboratorio trabajamos también, entre otras líneas, en el desarrollo de un sistema para la medición simultánea, y en tiempo real, de la respuesta acomodativa del ojo, el tamaño de la pupila y la calidad de la imagen retiniana. Nos proponemos comprender mejor el fenómeno de la acomodación en el ojo, ligado directamente con el desarrollo de ametropías (anomalías de refracción del ojo que causan hipermetropía, miopía o astigmatismo).

Los grupos españoles que trabajan en el área de aplicaciones ópticas en visión realizan una investigación básica de buen nivel. El siguiente paso sería disponer de una industria nacional o europea dispuesta a apostar por el desarrollo de esta instrumentación hacia prototipos de aplicación clínica.

En resumen, la introducción de nuevas técnicas ópticas y de procesado de imágenes en instrumentos no invasivos para uso en visión y oftalmología constituye un campo en el que las contribuciones que se están realizando facilitarán la detección precoz y el seguimiento de enfermedades oculares y completarán el estudio preciso de los primeras etapas del sistema visual humano.

PABLO ARTAL
Laboratorio de Optica,
Universidad de Murcia

Biomanipulación

Levadura de pan

Entre los primeros microorganismos, si no los primeros, que el hombre utilizó en su beneficio se cuentan las levaduras. Ya en Egipto, alrededor del año 4000 a.C., se empleaban para hacer pan, al aprovechar la capacidad de las mismas para producir gas y, por tanto, esponjar la

masa durante el proceso de fermentación panaria.

La capacidad de la levadura de panadería, *Saccharomyces cerevisiae*, para generar CO_2 y esponjar la masa hasta un nivel óptimo viene determinada por las condiciones de fermentación, por el aporte de nutrientes de la harina empleada y por las características de los microorganismos implicados.

En general, la harina de trigo contiene una gran cantidad de carbohidratos (almidón, sobre todo), pero una cantidad limitada (0,5 %) de azúcares fácilmente asimilables, que resulta insufiente para sostener el ritmo de fermentación necesario. El proceso de fermentación se sostiene por el consumo, por parte de la levadura, de la maltosa que resulta de la hidrólisis del almidón operada por enzimas específicas [β-amilasas (exo-α1,4 glucanohidrolasas)] presentes en la harina.

Ahora bien, la actuación de tales enzimas resulta en muchas ocasiones insuficiente, ya que sólo pueden liberar unidades de maltosa a partir de los extremos no reductores de las cadenas del almidón. Por ello, en la práctica panadera habitual, se han venido tradicionalmente agregando a la masa panaria otras enzimas que aseguren el aporte necesario de la maltosa requerida para que el proceso de fermentación siga adelante; suele emplearse, con ese fin, α-amilasa (endo-α1,4 glucanohidrolasa), enzima que produce la hidrólisis del almidón en dextrinas. A su vez, las β-amilasas presentes en la harina degradan las dextrinas en monómeros de maltosa.

La dextrinización del almidón confiere una textura más blanda al pan, además de retardar el endurecimiento del mismo. De las diferentes fuentes de α-amilasa existentes en el mercado, las de origen fúngico, y en particular la producida por *Aspergillus oryzae*, es la más utilizada, pero su empleo directo no está exento de problemas. Amén de constituir un aditivo más a añadir a la ya larga lista de los incorporados en el proceso de panificación, cuando se agrega en forma de polvo puede atacar las zonas húmedas de la piel y de las membranas mucosas, causando frecuentes irritaciones y procesos alérgicos de diversa consideración. El preparado comercial, además, suele contener otras actividades enzimáticas, proteasas por ejemplo, que pueden afectar negativamente la calidad del producto final.

Las cosas cambiarían y se resolverían los problemas de manipulación y acondicionamiento de la α-amilasa, si se consiguiera que la propia levadura sintetizara y secretara esta actividad enzimática. Y a ello se puso manos a la obra nuestro grupo del departamento de biotecnología del Instituto de Agroquímica y Tecnología de los Alimentos, de Valencia.

Levadura de pan biomanipulada: arriba, microfotografía de la levadura industrial modificada; en el centro, degradación del almidón producida por la levadura modificada, y, abajo, panes elaborados con ésta

El primer problema que nos encontramos residía en la complejidad del gen determinante de la α-amilasa de *Aspergillus oryzae*. Consta de ocho intrones, secuencias de ADN que no intervienen en la expresión de las proteínas. Puesto que la levadura es incapaz de procesar estos intrones, tuvimos que obtener, en primer lugar, los correspondientes ADNc, a partir de los ARNm aislados del hongo. Cultivamos *Aspergillus oryzae* en condiciones de inducción de la actividad amilolítica.

El ADNc correspondiente a la α-amilasa se obtuvo por la técnica multiplicadora ("amplificadora") de la reacción en cadena de la polimerasa, aplicada a oligonucleótidos sintéticos especialmente diseñados; nos sirvió de molde una fracción de los ADNc obtenidos en las condiciones anteriores. Este ADNc específico se puso bajo el control de un promotor de levadura fuerte y constitutivo (el promotor del gen de la actina, *pACT1*) que permite la expresión eficiente del mismo en las condiciones típicas de fermentación panaria.

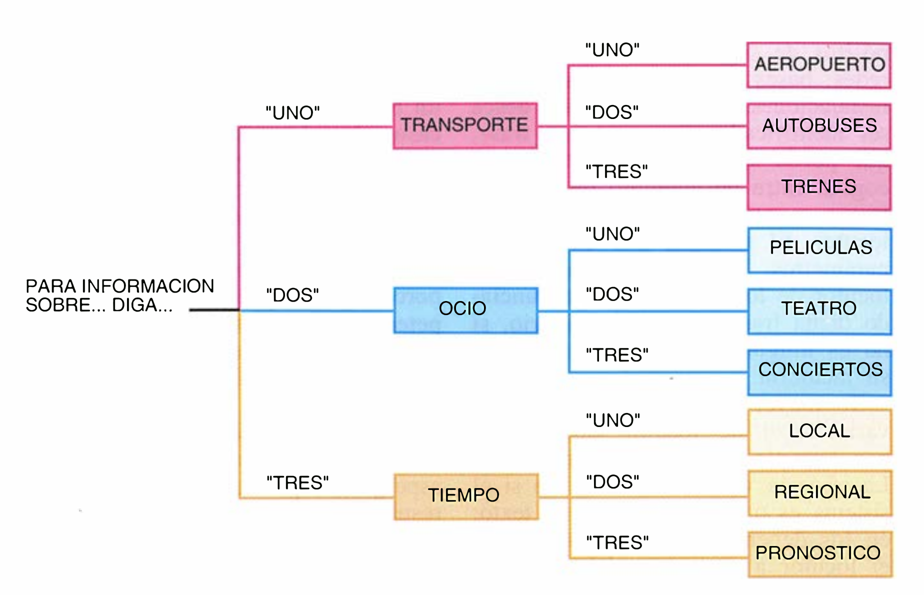
El siguiente paso era conseguir una cepa de levadura industrial de panadería que pudiera transformarse. Con ese propósito, construimos, mediante técnicas de genética clásica, cepas que mantenían las propiedades fermentativas típicas y eran auxótrofas para triptófano. Así preparadas, transformamos estas cepas con plásmidos episomales que contenían además del paquete de expresión (*pACT*-ADNc α-amilasa), el marcador de selección *TRP1* que complementa la auxotrofía de las cepas. Los transformantes obtenidos expresaban y secretaban una actividad α-amilásica de características bioquímicas (tamaño molecular, grado de glicosilación, pI, *p*H óptimo, temperatura óptima, temperatura de inactivación), similares a las de la enzima original.

Cuando abordamos su eficacia en pruebas de panificación, comprobamos que estas levaduras industriales modificadas producían un pan de menor densidad y textura más blanda que los elaborados con levaduras comerciales tradicionales. Además, después de 5 días de almacenamiento

a 4 grados C o a temperatura ambiente, los panes elaborados con las levaduras modificadas se conservaban más tiernos que los elaborados con las levaduras control.

Dado que estas levaduras modificadas producen la α-amilasa en la propia masa panaria, su empleo habrá de amortiguar la incidencia de los procesos alérgicos por exposición a la enzima, al no estar los operarios en contacto con grandes concentraciones iniciales del producto. Una vez más se confirmaba que la biotecnología mejoraba la calidad del producto, así como la calidad de vida y condiciones de trabajo de los profesionales de un sector industrial.

PASCUAL SANZ,
JOSE ANTONIO PRIETO
Y FRANCISCA RANDEZ-GIL
Departamento de Biotecnología
Instituto Agroquímica y Tecnología
de los Alimentos (CSIC). Valencia



Modo de utilización del sistema de Telefónica España S.A. para acceder a información en bases de datos vía telefónica mediante órdenes habladas

Tratamiento digital de la señal de voz

Técnicas y aplicaciones

Aunque el tratamiento digital de la señal de voz ha sido un campo activo de investigación durante las últimas décadas, sólo en años recientes ha progresado la técnica lo suficiente para pasar de los laboratorios a la vida real en un amplio rango de aplicaciones. Este desarrollo ha sido posible gracias a un rápido crecimiento en la capacidad de cálculo proporcionada por los microprocesadores y a la reducción del coste económico del cálculo y memoria, sin contar con el incesante interés comercial de proporcionar servicios de comunicación de alta calidad.

En razón de sus aplicaciones y técnica empleada, el campo del tratamiento digital de la señal de voz puede dividirse en varias áreas individuales, relacionadas entre sí: codificación, síntesis y reconocimiento de voz, reconocimiento de locutor y traducción simultánea.

Empecemos por la codificación de voz. En el procesado digital de la voz, el primer paso consiste en transformar la señal acústica en eléctrica mediante un micrófono para convertirla luego en una secuencia de números, el formato adecuado para su tratamiento digital. En el comercio se dispone ya de tarjetas útiles y económicas que cumplen esa misión en ordenadores personales. Dicha representación requiere, para calidad audio, 1,41 megabits por segundo, y, para calidad telefónica, 64.000 bits por segundo. El objetivo de la codificación de voz es reducir tanto como sea posible el número de bits por segundo manteniendo la calidad de la voz.

En la consecución de dicho proceso, se han desarrollado diversos estándares para diferentes aplicaciones, de acuerdo con la calidad requerida y el número de bits por segundo disponibles en el canal de comunicación. Estos estándares, que no son más que las especificaciones del algoritmo de tratamiento de la voz para garantizar la compatibilidad entre las diferentes realizaciones, han reducido de la forma siguiente el régimen binario necesario: para voz de calidad telefónica, hasta 4000 bits por segundo con el algoritmo CELP ("Code Excited Linear Production"); para calidad de voz tipo radio, hasta 32.000 bits por segundo con el algoritmo ADPCM ("Adoptive Differential Pulse Code Modulation"); y para calidad audio, tipo disco compacto, se ha llegado a 128.000 bits por segundo con el algoritmo PAC ("Perceptival Audio Coder"). Para llegar a estas velocidades de transmisión, hay que hacer uso de las propiedades perceptivas del oído, que es capaz de oír y enmascarar unos sonidos más que otros.

La síntesis de voz permite la transmisión de información máquina-hombre a través del canal telefónico. El método empleado puede ser doble: la concatenación de grabaciones realizadas y un sistema de conversión texto-voz (TTS). El primero de ellos almacena un vocabulario de frases y palabras codificadas digitalmente y responde a las peticiones formando un mensaje combinando las frases y palabras pregrabadas. El resultado se envía a un convertidor de digital en analógico.

Los sistemas TTS transforman un texto en voz. Empiezan por convertir el texto en una cadena de símbolos fonéticos, marcas de entonación y energía. Esta conversión requiere un análisis lingüístico detallado. A continuación, la cadena se convierte en voz a partir de diversos algoritmos de síntesis, enviando el resultado al convertidor de analógico en digital.

La técnica del reconocimiento de voz permite el control de equipos mediante la voz en forma de comandos hablados o secuencias continuas de palabras conectadas. No es fácil conseguir un reconocimiento preciso de voz debido a la variabilidad de la voz humana, del ruido ambiental y otros. La precisión de los sistemas comerciales depende de si el sistema se halla o no vinculado al locutor, si los comandos de voz son palabras aisladas, conectadas o continuas, de la amplitud del vocabulario a reconocer y de si hay un corrector sintáctico. Existen sistemas de reconocimiento de voz continua, independientes de locutor, con un vocabulario de unas 1800 palabras, con una tasa de error del 4 %.

Una aplicación son los contestadores automáticos. Telefónica España S.A. ha desarrollado un sistema en el cual el usuario, para acceder vía telefónica a la información requerida, se mueve a través de un menú, respondiendo las palabras "uno", "dos" y "tres" a las preguntas realizadas.

El reconocimiento de locutor determina si una secuencia de voz la ha pronunciado quien afirma haberla pronunciado, principalmente con pro-

pósitos de seguridad en el acceso a redes, bases de datos, ordenadores e instalaciones. El locutor que desea ser identificado pronuncia una frase, que puede ser, según el sistema, escogida entre un conjunto de posibles frases u otra a libre elección del locutor. El sistema, tras extraer sus parámetros, trata de determinar qué locutor de los posibles ha pronunciado dicha frase o, por el contrario, si no es ninguno de los registrados en su memoria.

Su mayor problema estriba en la variabilidad de locutor, que puede, por ejemplo, estar un día resfriado. La eficacia varía en función de si el sistema es o no dependiente de texto; en los dependientes de texto (donde el locutor a reconocer debe pronunciar una frase prestablecida) la variabilidad es menor que en los no dependientes de texto (donde el locutor pronuncia la frase que se le antoja). Su tasa de error es, para los dependientes de texto, de un 0,3 %, y para los independientes de texto, de un 3 % aproximadamente.

La traducción simultánea se propone lograr un diálogo entre locutores que no comparten el mismo idioma. Actualmente, estos sistemas son muy restrictivos en lo concerniente al vocabulario con el fin de lograr baja complejidad y alta precisión en el reconocimiento de voz. Los futuros sistemas deberán poseer también un reconocedor de idioma.

MIGUEL ANGEL FERRER BALLESTER
Universidad de las Palmas
de Gran Canaria

Aspergilosis pulmonar invasora

En pacientes inmunocompetentes

Aspergillus es un hongo saprófito ubicuo. Su puerta de entrada para provocar la infección es la inhalación de esporas por vía aérea. Produce así la aspergilosis pulmonar invasora (API), una neumonía necrotizante que se caracteriza por la proliferación de hifas de *Aspergillus* en el tejido pulmonar, desde donde invade los vasos.

La API es una infección grave, a menudo mortal, que suele descubrirse sólo después del fallecimiento. La mayoría de casos de API ocurren en pacientes con el sistema inmunitario deteriorado, como los portadores de cáncer y receptores de transplante.

Sin embargo, aunque de forma inusual, también se da en sujetos inmunocompetentes, es decir, que presentan un sistema inmunitario normal. De un tiempo a esta parte, el número de casos descubiertos en individuos inmunocompetentes ha experimentado un considerable incremento, según hemos comprobado en nuestro hospital de La Paz, en Madrid. En nuestro trabajo llama la atención no sólo el alto porcentaje de pacientes inmunocompetentes afectados, sino también el bajo índice de sospecha de la infección antes del fallecimiento (25 %).

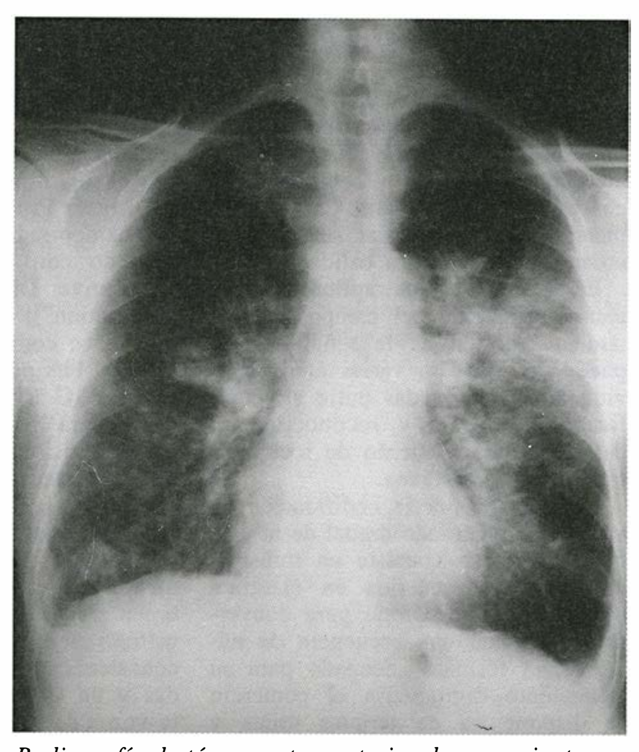
Se sabe que la rapidez diagnóstica es uno de los factores pronósticos más importantes en la curación de la aspergilosis pulmonar invasora. Pero resulta difícil descubrirla en pacientes inmunocompetentes cuando se halla en una fase precoz. Por ello los investigadores se afanan por buscar algunas claves que permitan su identificación temprana.

En ese contexto se han descrito diversas enfermedades y factores asociados a API en sujetos inmunocompetentes: alcoholismo, asma, fibrosis pulmonar, diabetes e infección previa por virus de la influenza A; sin embargo, algunos afectados no tienen ninguna enfermedad ni factor asociado. Asimismo, macrófagos y neutrófilos son tipos celulares decisivos en la defensa frente a *Aspergillus*. Los macrófagos atacan las esporas y los neutrófilos las hifas. Pero los pacientes inmunocompetentes con API no sufren alteraciones de neutrófilos ni macrófagos. Se ignora, pues, la patogenia real de la aspergilosis pulmonar invasora.

Ante esa situación, se postula que el episodio desencadenante sería, en ocasiones, la recepción de un gran inóculo de esporas de *Aspergillus*, como se ha demostrado en la exposición de un granjero a la dispersión de estiércol. En otros casos, el virus de la influenza A, causante de la gripe, predispone a una sobreinfección por hongos al destruir el epitelio ciliar. Esto favorece invasiones secundarias por gérmenes (bacterias, virus y hongos). El virus de la gripe también provoca cambios transitorios cuantitativos y funcionales de las células *T*, que facilita infecciones secundarias. Se han comunicado ocho casos de API subsiguientes a la infección por virus de la influenza A en pacientes inmunocompetentes. La verdadera incidencia de API después de una gripe podría estar subestimada.

Los síntomas que manifiesta la aspergilosis pulmonar invasora son inespecíficos. Además, no existen diferencias entre pacientes con y sin inmunodepresión. Los datos clínicos más frecuentes son fiebre y dificultad respiratoria. La tos puede estar o no presente. El dolor torácico es inusual. En la API el patrón de radiología torácica más común es bronconeumonía bilateral, aunque las lesiones iniciales en la radiografía de tórax son nódulos solitarios o múltiples.

Ante la sospecha de API, se recurre a la tomografía computarizada o resonancia magnética nuclear, aunque el diagnóstico definitivo requiere, por supuesto, la demostración histológica de invasión por *Aspergillus*. El aislamiento de *Aspergillus* de secreciones respiratorias habitualmente sólo significa colonización, a no ser que se trate de pacientes inmunodeprimidos con neumonía, en particular si se aísla del lavado broncoalveolar. No obstante, la sensibilidad del aislamiento de *Aspergillus* de secrecio-



Radiografía de tórax posteroanterior de un paciente con aspergilosis pulmonar invasora. Se aprecian infiltrados pulmonares bilaterales, indicativos de bronconeumonía bilateral

nes respiratorias en la API no sobrepasa el 64 %. Es decir, más de la tercera parte de enfermos no se detectarían con este método.

La administración intravenosa de anfotericina B es el tratamiento de elección de la API. Una dosis alta de anfotericina B suele ser indicada en pacientes inmunodeprimidos; en inmunocompetentes son eficaces dosis más bajas. Se ha comprobado recientemente que la respuesta de API a antimicóticos orales, como el itraconazol, es buena y bien tolerada, incluso durante meses o años. La cirugía en la API queda limitada a situaciones aisladas.

DAVID ALBA
Dpto. de Medicina Interna
Hospital "La Paz". Madrid

La jungla de los derechos

Todo se había acabado antes de que comenzase realmente la discusión. El 29 de diciembre de 1994, la red de servicios CompuServe anunció que, a partir de entonces, cobraría derechos de uso sobre el Graphics Interchange Format, o GIF. En las redes de ordenadores se elevaron alaridos electrónicos de protesta. El archivo GIF es el equivalente en el mundo de las redes de la copia fotográfica. Contiene cifradas millones de imágenes en discos en todo el mundo.

Unisys, propietaria de la patente cuya infracción había obligado a CompuServe a pedir el canon en primer lugar, lo aclaró a primeros de enero. Deseaba cobrar derechos solamente a los usuarios dedicados a la creación de soporte lógico que cifraban o descifraban archivos GIF con fines lucrativos. Unisys no tenía intención de cobrar por almacenamiento o transmisión de GIF. Deseaba percibir un pequeño canon, alrededor del 1 por ciento del precio medio de venta. Y no se lo cargaría a nadie que hubiese desarrollado un programa antes de 1995, esto es, antes del aviso de CompuServe.

La próxima vez, sin embargo, las cosas podrían ser distintas. Aunque las circunstancias del caso GIF no eran en manera alguna típicas, la aplicación de la lenta normativa de protección de patentes al rápido desarrollo de sistemas de soporte lógico lleva consigo el riesgo de que alguien, algún día, decida mantener al mundo de las redes bajo chantaje. Quizá, para resolver los problemas de propiedad intelectual creados por el soporte lógico, se necesite una tercera forma de protección legal para las ideas: ni los derechos de copia ni las patentes, sino algo poco corriente.

La dificultad de las patentes para el soporte lógico es que son demasiado generales e inflexibles y, además, lentas. Una patente concede la propiedad de una idea y punto. Pero una patente tarda entre un año y medio y dos años en expedirse. Las patentes de programas complicados pueden tardar más.

Pero dos años es también la vida de la mayor parte de los productos de soporte lógico. La Internet cuadruplica su tamaño cada dos años (ahora abarca más de tres millones de ordenadores). Algunas porciones del mundo de las redes crecen todavía más rápidamente. De 1992 a 1994, la World Wide Web ("telaraña mundial"), que enlaza texto, imágenes, vídeo y sonido, pasó de cientos de puntos a cientos de miles de ellos. En 1994, la Oficina de Patentes y Marcas Registradas de los EE.UU. aprobó unas 4500 solicitudes. Imaginen ahora lo que podría haber sucedido —lo que podría todavía suceder— si una patente solicitada en 1992 cubriese una componente clave de la Web.

Al otro lado de la valla de propiedad intelectual, los derechos de copia se exponen a perder de vista el objetivo del soporte lógico. Se ideó para cubrir el texto de un documento o el aspecto de una ilustración, en vez de la función de una pieza de maquinaria (o de una porción de soporte lógico). No obstante, es precisamente la función lo que da valor al soporte lógico. Ciertamente, el derecho de copia se concede en cuanto la cosa se ha "publicado". Pero puestos a elegir entre el abrumador poder comercial de una patente o la velocidad relámpago del derecho de copia, ¿cuál cree Vd. que elegirían los creadores de programas?

Pamela Samuelson, de la Facultad de Derecho de la Universidad de Pittsburgh, Jerome H. Reichman, de la de Vanderbilt, Mitchell D. Kapor, fundador de Lotus Development, y Randall Davis, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, recomendaron la creación de un terreno intermedio para el soporte lógico. La propiedad comenzaría inmediatamente, sin las largas deliberaciones requeridas para las patentes. Duraría solamente unos años, en lugar de los 19 de una patente o los 75 de los derechos de copia. La pregunta interesante, sin embargo, que en sus propuestas se dejó abierta para debatir, es precisamente sobre qué daría la ley el derecho de propiedad.

El derecho de propiedad concede el control sobre un texto de un documento, pero no sobre las ideas allí contenidas. Las patentes protegen ideas para construir cosas que cumplan una función. Definir la tierra de nadie entre la idea y la expresión para que encaje en la tierra de nadie de la propiedad intelectual no es empresa baladí. Presumiblemente nadie podría copiar un programa de soporte lógico. Pero, ¿qué ocurre si dos investigadores salen con la misma idea independientemente? ¿Y si sólo se copia determinada parte del programa?

No son preguntas fáciles de responder. Pero vale la pena debatirlas, dada la carnicería legal que las patentes podrían desatar en la industria de la programación. Por supuesto, vale la pena recordar que las leyes malas no son la única razón de que ocurran cosas malas. La gente puede simplemente hacerse un lío. Y mientras que el mensaje de CompuServe pone de relieve los peligros de leyes menos que perfectas, los verdaderos hechos del caso son un ejemplo del embrollo.

He aquí los hechos. En 1985 se concedió a Sperry, que se había unido con Burroughs para formar Unisys, una patente sobre un método de compresión de datos llamado algoritmo de Lempel Zev Welch (LZW). CompuServe no pareció darse cuenta. En 1987, CompuServe comenzó a desarrollar el GIF para almacenar y transmitir imágenes gráficas basado en el algoritmo LZW. Unisys no pareció enterarse. Desde 1987 hasta 1993, CompuServe animó alegremente a los programadores a usar el GIF. Muchos lo hicieron. En 1994, cuando Unisys obligó a CompuServe a pagar derechos sobre el LZW para archivos GIF, cualquiera se habría dado cuenta de que ambos trataban de cargar esos derechos a la red. Afortunadamente, el sentido común y la humildad ganaron la partida, al menos esta vez.

JOHN BROWNING

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Falacias de Fibonacci

"Damas y caballeros, un brindis... ¡Por la Reina!" Nos pusimos en pie, alzamos ceremoniosamente nuestras copas y murmuramos el nombre de la soberana. El momento, solemne, fue echado a perder por mi vecino de mesa, quien se dejó caer desmayadamente en su silla y murmuró: "¡Gracias a Dios, por fin se puede fumar!" (Es una curiosa costumbre británica que en una cena formal nadie pueda fumar hasta haber brindado a la salud de la reina.)

"Preferiría que no lo hiciera", le dije. "No soporto el humo."

"Pues al salmón ahumado no le ha hecho ascos", retrucó, soltando una carcajada al tiempo que encendía un cigarrillo. Arrugué la nariz y le eché una mirada a su identificador: Richard Byrd. Pero encima había escrito a lápiz: "Llámeme Dicky."

"El salmón, sea dicho de paso, era terrible", le repliqué. "La verdad es que era caballa teñida de rojo." Dicky no pareció mostrar sorpresa alguna. La cena anual de la Asociación para las Donaciones Desgravables (ADD) era indefectiblemente un desastre gastronómico.

"Me estaba preguntando por qué el pescado parecía llevar collera", dijo la señora sentada a mi izquierda. Me la había encontrado ya en otras reuniones: se trataba de Amanda Pasta-Gansa, una de las luminarias de la Sociedad Protectora de Animales de la localidad.

"No, querida, es que se te cayó el servilletero en el plato", le gritó su marido, situado cinco puestos más allá, del otro lado de la mesa. Alejo Pasta-Gansa, abogado, estaba encajonado entre un médico, Félix Tanatus, y Dennis Racket, viejo amigo mío del club de tenis.

"¿A qué se dedica usted?", me preguntó Dicky.

Me incliné hacia él y le susurré: "Soy matemático."

Como siempre, y a pesar de haber hablado por debajo del umbral de percepción auditiva, mis palabras cayeron como un jarro de agua fría. La mesa entera quedó en silencio.

"Yo nunca fui...", empezó a decir.

"Muy bueno en matemáticas cuando estudiaba", apostillé yo. "Lo dice todo el mundo."

"Entonces las detestaba", murmuró Félix. "Y las sigo abominando."

"¡En tal caso, yo soy la excepción!", retumbó una voz a mi derecha. "¡A mí me encantaban! Me llamo Adán Machuca. Soy físico nuclear. Si me permiten, voy a ponerles un problemita a todos ustedes. Vamos a ver, ¿cuál es el número siguiente en la sucesión 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21?"

"Diecinueve", rezongué automáticamente, mientras luchaba a brazo partido con un pastelito de hojaldre, al parecer amasado con cemento.

"No es usted quien tiene que contestar", protestó. "Y además, está equivocado. El número correcto es 34. ¿Qué le hace pensar que es 19?"

Apuré mi copa. "De acuerdo con el clásico libro de Carl E. Linderholm *Matemáticas: más difíciles todavía*, el término siguiente siempre es 19, cualquiera que sea la suce-



sión: 1, 2, 3, 4, 5, ... 19 y también 1, 2, 4, 8, 16, 32, ... 19. La regla vale igualmente para 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17 ... 19."

"Eso es ridículo."

"No. Es una regla sencilla, universalmente aplicable y, por tanto, superior a cualquier otra solución. La fórmula de interpolación de Laplace permite ajustar un polinomio a una sucesión cualquiera, así que se puede elegir como número siguiente el que se quiera y tener para hacerlo una razón perfectamente válida. Para mayor sencillez, se puede elegir siempre el mismo número."

"¿Y por qué 19?", quiso saber Dennis.

"Se supone que es una unidad mayor que su número favorito", dije yo, "con el fin de tomarle el pelo a quienes pretenden psicoanalizar a los demás basándose en sus números favoritos."

"Todo eso son bobadas. Voy a decirles la auténtica razón", terció el físico. "Cada número es la suma de los dos anteriores. Así pues, el siguiente es 13 + 21, o sea 34. Y después viene 55, y después 89, 144 y así sucesivamente. Es la ..."

"Sucesión de Fibonacci", le interrumpí. "¡Estoy hasta los pelos de la condenada sucesión de Fibonacci! ¡Hasta el nombre es falaz! 'Leonardo Fibonacci, hijo de Bonacci!' No es más que un mote inventado por Guillaume Libri en 1838, mucho después de muerto Fibonacci. El célebre Fibonacci se llamaba en realidad Leonardo Pisano Bigollo. Pisano significa que vivía en Pisa; nadie sabe qué significa Bigollo. Sea como fuere, la sucesión debería llamarse sucesión de Leonardo Pisano Bigollo; lo que pasa es que el nombre es demasiado largo."

"Ustedes los matemáticos tienen una manía muy fuerte", señaló Dicky. "Al menos, una tendencia que se diferencia de las de casi todo el mundo."

"Tienen tendencia a la demostración", declaró Adán. "Los matemáticos se empeñan siempre en demostrarlo todo. Se trata, ciertamente, de una manía rara. Yo, por mi parte, jamás he sabido a qué se debe. Si uno ensaya una y otra vez la misma cosa y siempre funciona, ¡tiene que estar bien! Así pues, ¿por qué perder el tiempo metiéndose en toda clase de embrollos lógicos con la intención de demostrar algo tonto?"

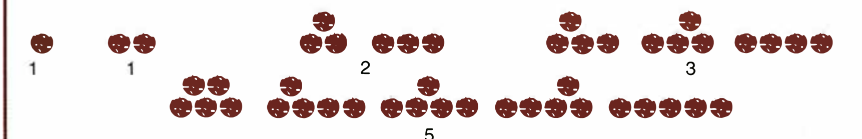
"Vaya, hombre. ¿Y por qué se molestan ustedes los físicos en hacer experimentos? Si una teoría les dice lo que desean oír, ¿por qué no dar por hecho que es verdadera?"

Sucesión de Fibonacci... ¿auténtica o falsa?

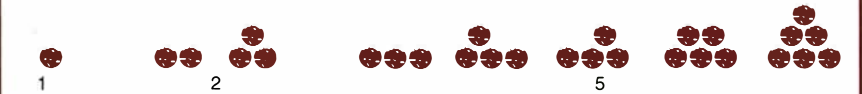
La primera sucesión es 2, 3, 5, 8, 13, ..., a_n, donde a_n es igual a 1 más la suma de los n primeros términos de la sucesión de Fibonacci. Por ejemplo, $a_1 = 1 + 1 = 2$; $a_2 = 1 + (1 + 1) = 3$; $a_3 = 1 + (1 + 1 + 2) = 5$ y así sucesivamente.

La segunda sucesión es 1, 3, 8, 21, 55, ..., a_n, donde a_n es igual a la suma de los n primeros términos de la sucesión obtenida al eliminar uno de cada dos números de Fibonacci. Así, $a_1 = 1$; $a_2 = 1 + 2 = 3$; $a_3 = 1 + 2 + 5 = 8$, y así sucesivamente.

La sucesión número 3 es 1, 1, 2, 3, 5, 8, ..., a_n, donde a_n es el número de formas en que se pueden disponer n monedas en hileras horizontales de suerte que todas las monedas de cada hilera se toquen y cada moneda situada sobre la hilera más baja toque a dos monedas de la hilera inferior.

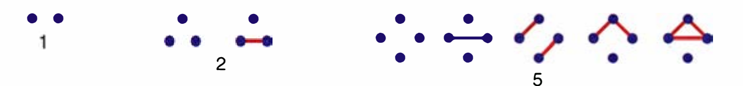


La sucesión número 4 es 1, 2, 5, 13,..., a_n. Es la misma que la sucesión número 3, salvo que ahora n es el número de monedas de la hilera más baja.



La sucesión 5 es 1, 2, 5, 13, ..., a_n, donde $a_n = (n - 1)2^{n-2} + 1$.

La sucesión 6 es 1, 2, 5, 13, ..., a_n, definida por el número de grafos disconexos con $n + 1$ vértices.



La sucesión 7 es 1, 1, 2, 3, 5, 8, ..., a_n, donde a_n es el entero más próximo a $((1 + 5)/2)^n/ 5$.

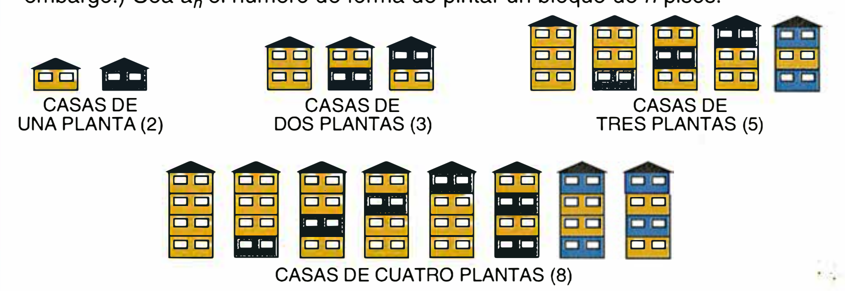
La sucesión 8 es 1, 2, 5, 13, ..., a_n, definida por el número de grafos conexos con $n + 2$ vértices que tienen exactamente un ciclo.



La sucesión 9 es 1, 2, 5, 13, ..., a_n, donde a_n es el coeficiente de $x^{n+2}/(n + 2)!$ en el desarrollo en serie de potencias de la ecuación diferencial $y'' = e^x y$, que comienza $y = 1 + x^2/2! + x^3/3! + 2x^4/4! + 5x^5/5! + 13x^6/6!$ ...

La sucesión 10 es 1, 2, 5, 13, ..., a_n, en la que a_n es igual a $a_{n-1} + na_{n-2}$, cuando $a_{-1} = a_0 = 1/2$.

La sucesión 11 es 2, 3, 5, 8, 13, ..., a_n. En esta sucesión hay que pintar de azul y amarillo bloques de viviendas de n pisos, con la regla de que no haya dos pisos adyacentes pintados de azul. (Sí pueden ser amarillos, sin embargo.) Sea a_n el número de forma de pintar un bloque de n pisos.



Soluciones

Sucesión 1: de Fibonacci. Por ejemplo, para formar a_6, se suma 8, el sexto término de la sucesión de Fibonacci. La suma es 8 + 13, suma de términos consecutivos de Fibonacci. Por definición, entonces, el resultado, 21, es a su vez un número de Fibonacci. Esta pauta continúa.

Sucesión 2: de Fibonacci. Por ejemplo, para pasar de a_5 a a_6, se suma 89. La suma es 55 + 89, que es suma de números de Fibonacci consecutivos. Por definición, pues, el resultado, 144, es también un número de Fibonacci. La pauta continúa.

Sucesión 3: falsa. Esta sucesión prosigue 12, 18, 26.

Sucesión 4: de Fibonacci. La demostración se basa en la identidad $f_{2n-1} = f_{2n-3} + 2f_{2n-5} + 3f_{2n-7} + ... + (n-1)f_1 + 1$, que es verificada por los números de Fibonacci, f_n.

Sucesión 5: falsa. La sucesión continúa 33, 81, 193.

Sucesión 6: falsa. La sucesión continúa 44, 191, 1229, 13.588

Sucesión 7: de Fibonacci. Esta regla se deduce de la fórmula de Binet $f_n = [((1 + \sqrt{5})/2)^n + ((1 - \sqrt{5})/2)^n]/\sqrt{5}$.

Sucesión 8: falsa. La sucesión continúa 33, 89, 240, 657, 1806.

Sucesión 9: falsa. La sucesión continúa 36, 109, 359, 1266.

Sucesión 10: falsa. La sucesión continúa 38, 116, 382.

Sucesión 11: de Fibonacci. Fijémonos, por ejemplo, en un edificio de cinco pisos. El quinto piso puede ser amarillo o azul. Si es amarillo, el resto del edificio puede ser pintado de tantas formas como un edificio de cuatro plantas. Si es azul, el cuarto piso ha de ser amarillo, y el resto del edificio puede ser pintado de tantas formas posibles como un edificio de tres pisos. Por tanto, $a_5 = a_4 + a_3$, como les sucede a los números de Fibonacci. La regla es general.

Sucesión de números primos impares: Falsa. La sucesión 3, 5, 7, 11... 331, 337 y así sucesivamente está formada por todos los números n que dividen exactamente a $2^{n-1} - 1$. El siguiente término es 341, que no es primo (11 × 31 = 341), pero es divisor de $2^{340} - 1$.

"¡Porque no se puede ir por ahí confiando en teorías no verificadas!"

"Pues los matemáticos consideran que no se puede ir por ahí creyendo en teoremas no demostrados. Alejo, ¿por qué os empeñáis los abogados en que los casos sean vistos ante un tribunal? ¿Por qué no dejar que el juez estudie las pruebas que le ha aportado la policía y decida si el acusado ha cometido el delito?"

"¡Eso no se puede hacer! Podría producirse un error judicial."

"Exactamente. Y eso es lo que preocupa a los matemáticos al empeñarse en que se den las demostraciones. No quieren descubrir más tarde que se habían equivocado. Podría resultar embarazoso."

Adán movió la cabeza con un ademán de cansancio. "Sabe usted perfectamente bien que no es así. Las matemáticas son fundamentalmente simples. Si se observa una regla evidente, no es posible que sea coincidencia. ¿Por qué hay que molestarse en demostrarla?"

Reflexioné durante unos segundos. "Voy a darle un ejemplo. Aquí tiene una sucesión. Quiero que me diga cuál será el número siguiente."

"Haré lo que pueda."

"1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55", dije yo.

Me miró desconcertado. "Eso es una bobada. Acabo de preguntarlo yo. Es la sucesión de Fibonacci."

"¿De veras? ¿Cuál es entonces el número siguiente?"

"89", replicó Adán.

"Está equivocado. Es 91."

"Pero si parece precisamente la ..."

"Adán, está usted saltando a las conclusiones, basándose en prejuicios anteriores. Una actitud muy imprudente. La sucesión que usted nos propuso era la sucesión de Fibonacci, mientras que el n-ésimo término de la mía es el mínimo entero no inferior a $\sqrt{e^{n-2}}$, siendo $e = 2{,}71828$, la base de los logaritmos naturales. Yo pido el undécimo término, que es el menor de los enteros no menores que $\sqrt{e^9}$, o sea, a 90,0017. Ese entero es 91."

"Humm... Bueno, eso es un accidente, una excepción curiosa. Estaría dispuesto a creerle, si pudiera mostrarme más ejemplos de sucesiones que inducen a error", terció Alejo. "¿Puede usted hacerlo, o se le ha agotado ya el repertorio?"

"Los hay a centenares", respondí. "Es más fácil de lo que usted cree. Y Richard K. Guy, un matemático de la Universidad de Calgary, los colecciona. Se refiere a todos ellos con el nombre de Ley Fuerte de los Pequeños Números. No hay suficientes números pequeños para cumplir los muchos requisitos que se les imponen, por lo que aparentes regularidades con números pequeños pudieran ser meras coincidencias. Y con frecuencia lo son."

Les presenté entonces 11 sucesiones análogas a los números de Fibonacci, o los números de Fibonacci de lugar impar, como 1, 2, 5, 13 y sucesivos [*véanse las sucesiones en el recuadro de la página precedente*]. Les pedí a los presentes que decidieran cuáles de ellas eran verdaderas sucesiones de Fibonacci y cuáles podrían ser mera coincidencia [*las soluciones, en el recuadro de esta página*].

Los reunidos empezaban a discutir cuando les propuse un último problema. "¿Cuál es el término siguiente en la sucesión 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, ..." —me dediqué durante un rato a recitar números primos— ... 331, 337?"

"Esa es la lista de los números primos impares", dijo Adán. "No se pueden generar los números primos por accidente. El término siguiente tiene que ser... uhm... 347."

"¿Está usted bien seguro?", pregunté tranquilamente.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

JUEGOS MATEMÁTICOS: LAS REGULARIDADES OBSERVADAS EN LOS NÚMEROS PRIMOS SON REFLEJO DE LA LEY FUERTE DE LOS PEQUEÑOS NÚMEROS. Martin Gardner en *Investigación y Ciencia*, febrero de 1981, páginas 102-106.

A DIARY ON INFORMATION THEORY. Alfréd Rényi. Wiley, 1987.

THE STRONG LAW OF SMALL NUMBERS. Richard K. Guy en *American Mathematical Monthly*, vol. 95, n.º 8, páginas 697-712; octubre de 1988.

THE SECOND STRONG LAW OF SMALL NUMBERS. Richard K. Guy en *Mathematics Magazine*, vol. 63, n.º 1, páginas 3-20; febrero de 1990.

Libros

J. Vilardell, Javier de Lorenzo, León Garzón y Luis Alonso

Ingeniería

Española

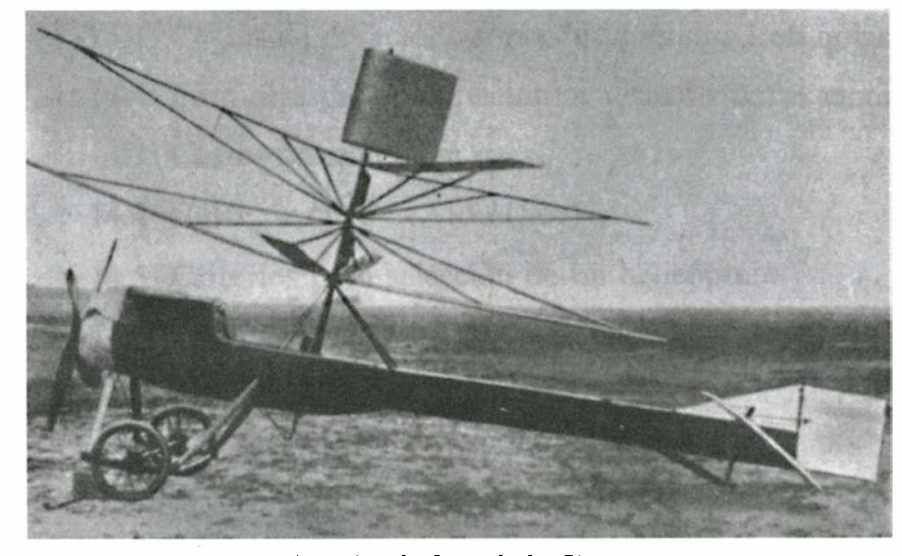
Helicópteros. Teoría y diseño conceptual. José Luis López Ruiz. Escuela Superior de Ingenieros Aeronáuticos; Madrid, 1993.

La singularidad de esta obra no radica sólo en el tema en sí mismo, sino también en el hecho de haberse escrito en español. Respecto a la primera observación podría aducirse que un helicóptero no encierra misterio alguno en nuestros días. Y es verdad; pero ocurre que esta obra poco tiene de divulgativa en el sentido que comúnmente se le atribuye al adjetivo. Estamos ante una obra más formativa que informativa, cuya lectura demanda una base suficientemente sólida de conocimientos de mecánica clásica, mecánica de fluidos y aerodinámica, sin dejar de lado la resistencia de materiales y el cálculo estructural, como cabe esperar del público al que esencialmente estaban dirigidos los apuntes que dieron origen al texto impreso, es decir, a los alumnos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos de la Universidad Politécnica de Madrid.

Ahora bien, desde esta perspectiva, no podemos dudar de que también será provechosa para quienes, desde unos conocimientos parejos, y acaso una cierta experiencia, en torno a las disciplinas que antes señalábamos deseen adentrarse en el terreno del funcionamiento y diseño de los helicópteros sin recurrir a textos escritos en otros idiomas. Y éste es precisamente el otro aspecto de la singularidad de esta obra a que aludíamos, aspecto al que hay que añadir, como valor subsidiario pero muy destacable, el hecho de que el léxico de la especialidad está entroncado de manera natural con el cuerpo del texto, cosa que por desgracia no siempre es el caso en las obras acerca de cualquier disciplina traducidas a nuestro idioma, y tanto menos cuanto más especilizada es esa disciplina. Para comprobar la carencia de documentación escrita en español basta con echar un vistazo a la referencia bibliográfica de la misma obra que aquí tratamos, de la que no puede decirse, ni por aproximación, que no esté bien documentada.

Helicópteros. Teoría y diseño conceptual es fruto de años de actividad docente. Posiblemente esta circunstancia haya redundado en la indudable claridad y amenidad de la exposición, esta última dentro de los límites que imponen siempre unos desarrollos matemáticos áridos de por sí, incluso para quienes la matemática constituye una herramienta de trabajo habitual. A lo largo de sus más de setecientas páginas, en el libro se sistematizan los temas que conforman la teoría de los helicópteros monorotores, empezando por la mecánica y la aerodinámica de palas y rotores, para seguir con actuaciones, estabilidad y control, cálculo estructural, vibraciones, fatiga de los materiales y ruido y análisis de masas y dimensionado general, temas sobre alguno de los cuales se presentan teorías originales ("cantidad de movimiento modificada", "solución a la ecuación de De la Cierva para el movimiento de batimiento de palas articuladas", "curva universal de potencia para el cálculo de actuaciones",...). En los dos últimos capítulos se presentan cuestiones quizás al alcance de la comprensión de un público menos preparado, aunque interesado: "Costes" y "Helipuertos". Al final de los capítulos se ofrecen ejercicios de aplicación para los que se mantiene el mismo helicóptero, "con objeto de poder comparar la precisión de los resultados que se obtienen al utilizar las diversas teorías y el trabajo que requiere su aplicación".

La referencia a los datos relativos, en forma tabular, a helicópteros actualmente en servicio es una constante en todo el libro, así como la referencia a las normas vigentes, tanto civiles como militares, para las distintas cuestiones que se van planteando. (J. V.)



Autogiro de Juan de la Cierva



Creaciones matemáticas

Espirales

Spirals. From Theodorus to chaos, por Philip J. Davis. A. K. Peters Ltd.; Wellesley, MA, 1993.

La obra se estructura en tres partes. En la primera incluyo las conferencias, modificadas y ampliadas, que dan origen al libro y que fueron pronunciadas por Davis a invitación de la Asociación Matemática de Norteamérica para conmemorar su

75 aniversario; las 84 notas de carácter histórico, matemático y cultural que van al final del libro; y, especialmente, las más de 60 figuras que acompañan al texto y que se han obtenido, en su gran mayoría, por computador. Las figuras, al igual que ocurre con todos los ideogramas matemáticos, son parte constitutiva del texto.

El título "Desarrollos técnicos" cubre la segunda parte, puramente matemática, y se escinde en dos suplementos. En el A, escrito por W. Gautschi, se estudia la función que define la espiral de Teodoro y que, de entrada, viene formulada en forma paramétrica en el plano complejo. De modo inmediato se busca su expresión en términos de series infinitas, pero se comprueba que estas series convergen muy lentamente. Ello conduce a la búsqueda de fórmulas de convergencia rápida a través de la sumación por integración. Búsqueda que pasa por la función zeta de Riemann y que posibilita enfoques de carácter más numérico, hasta alcanzar una fórmula cuadrática gaussiana y su computación. Esta evaluación numérica exige el empleo del ordenador, aunque ello venga admitido de modo implícito. Manejo que vuelve a ponerse de relieve en el suplemento B, escrito por A. Iserles, donde el estudio técnico de la espiral de Teodoro se hace ahora desde terrenos algebraicos más que puramente funcionales y en el interior de una disciplina como la que estudia los sistemas dinámicos. Para ello se define la función espiral a través de matrices complejas y se principia con norma euclídea en un espacio unidimensional. A pesar de esta simplificación, el estudio dinámico de la espiral ofrece un campo de trabajo matemático no trivial que implica que, al pasar a *d* dimensiones, se tenga, como señalará Iserles, un auténtico desafío de creación matemática.

La tercera parte se estructura en dos. Una antología de textos traducidos al inglés y que viene compuesta por dos muy breves de Platón, *Sobre las espirales* de Arquímedes, *De Infinitis Spiralibus* de Torricelli (hacia 1645), uno de los problemas de Bernoulli de 1711, una nota de Sylvester de 1860 y otra de Poincaré de 1882, para culminar con el artículo sobre la equidistribución de los ángulos de una espiral de raíz cuadrada que Hlawka publicó en 1980 y que, en el fondo, es el que sugirió el tema. Inmediato, un epílogo en el que Davis vuelve a empalmar con el tema de sus conferencias. La obra culmina con una amplia bibliografía.



Concha en espiral desarrollada por Ancyloceras gigas, *ammonites del Cretácico*

Philip J. Davis, matemático conocido en el ámbito español por dos de sus obras escritas en colaboración con Hersch (*Experiencia matemática* y *El sueño de Descartes*), confiesa haber elegido el tema de la espiral como hilo conductor para mostrar, por un lado, cómo ha trabajado y trabaja el matemático; por otro, que los motivos para ese trabajo vienen aportados, en general, por problemas que surgen en otras disciplinas. Para Davis "la matemática ha sido siempre algo más que su forma, su contenido, su lógica, sus estrategias o sus aplicaciones"; constituye una de las grandes experiencias intelectuales humanas y requiere, para su captación, de aproximaciones más liberales que las dadas en los textos tradicionales.

Desde esta posición conceptual, Davis presenta la matemática no como algo acabado, sino como un permanente trabajo. Y aunque aparentemente se esté con un tema que puede estimarse de apariencia trivial o más bien estético —la espiral—, ese tema encuentra una enorme variedad de enfoques que obligan no sólo a manejar sino también a elaborar o crear un instrumental matemático que pertenece a campos tan diferentes como el análisis de variable compleja, álgebra, análisis ergódico, cálculo numérico, ecuaciones diferenciales no lineales, teoría de la computación... Instrumental matemático nada trivial como ponen de relieve no ya las propias conferencias de Davis, sino los ensayos de Gautschi y de Iserles o el texto de Hlawka incluido en la antología.

Desde la formulación que Platón atribuye en *Teeteto* a Teodoro de la construcción de los números irracionales desde la raíz cuadrada de 2 hasta la raíz cuadrada de 17, pasando por la determinación de la longitud del arco de la curva espiral establecida por Torricelli en términos geométricos —y que es la primera determinación de la longitud de un arco de curva no racional, según los datos históricos conocidos—, Davis alcanza, ahora desde lo computacional, a los sistemas iterativos complejos que culminan en lo que se denomina, en términos realmente desafortunados, teoría del caos.

Cubriendo su tesis, Davis acude a la historia, y no sólo de la matemática, básicamente en el apéndice y en las notas, muy amplias casi todas ellas. Al hacerlo, y de modo casi explícito, Davis viene a sostener, entre otras, una antigua tesis de quien escribe este comentario. El trabajo matemático es un hacer que muestra un estilo matemático propio en cada etapa y que se transforma cambiando de estilo, de principios reguladores, aunque no de elementos constitutivos. Es muy diferente el estilo geométrico de Arquímedes y el de Torricelli al de Bernoulli donde se habla de infinitésimos y diferenciales, o al hacer del análisis de variable compleja donde lo que importa es el estudio de la función dada, o al hacer computacional actual donde se trabaja con algoritmos de iteración para obtener convergencias rápidas mediante el computador... Estilos matemáticos distintos que subtienden marcos y métodos conceptuales diferentes, aunque todos ellos tengan un elemento constitutivo aparentemente igual, en este caso la espiral. Pero todos éstos son, ya, términos no de Davis sino de quien hace este comentario...

Apasionante libro para quien sienta la matemática y para quien pretenda una aproximación matemática a la matemática y no una aproximación de pretendidos fundamentos que sólo hacen marginaciones de aquello sobre lo cual tendrían que pensar y captar. El libro de Davis exige, es claro, del lector. Pero es una mínima exigencia que se puede pedir para aquello que es auténtico y, en este caso, para una obra que se pretende como una aproximación vital al verdadero hacer matemático. (J. L.)

Ciencia mexicana

Física de materiales

ADVANCED TOPICS IN MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING. Dirigido por J. L. Morán-López y J. M. Sánchez. Plenum Press, Nueva York, 1993.

Cuando se piensa en las edades del hombre (de la piedra, de los metales, del bronce y del hierro), llama la atención el acierto que tuvieron los historiadores al establecer esa estratificación, la cual, lejos de ser arbitraria, está bien fundamentada sobre datos empíricos. Estos, a su vez, representan la respuesta al "leitmotiv" que ha venido presidiendo la evolución de la humanidad desde sus orígenes, y que podríamos concretar en el afán que siempre ha tenido el hombre de satisfacer su curiosidad por conocer el entorno que le rodea y, de rechazo, unas necesidades cada vez más exigentes para lograr instalarse en niveles de creciente bienestar. En ambos aspectos, conocimiento-beneficio (entre los cuales existe una clara sinergia) subyacen los conceptos de ciencia y tecnología.

Todo parece indicar que la de los nuevos materiales contribuirá, por derecho propio, a formar un nuevo estrato, una nueva era de la humanidad, que se podría interpretar con los mismos supuestos anteriores: poder satisfacer unas necesidades más exigentes que las precedentes, y otras nuevas, surgidas a consecuencia del sinergismo al que antes nos referimos. De aquí la importancia e interés que ofrecen las publicaciones sobre nuevos materiales, especialmente cuando contemplan, simultánea y equilibradamente, las vertientes científica y tecnológica. Este es el caso del libro que reseñamos. Contiene las ponencias presentadas en el simposio que, sobre ciencia e ingeniería de materiales, tuvo lugar en septiembre de 1991 en Ixtapa, en el estado mexicano de Guerrero.

El lector ve desfilar las superaleaciones, los materiales avanzados con vocación aeroespacial, los cementos polielectrólitos, los materiales compuestos avanzados (por ejemplo, textiles) y los aspectos concernientes a las propiedades, así como a los factores que controlan su utilización (por ejemplo, fatiga y corrosión). Otras ponencias se refieren a la caracterización y propiedades de nuevos materiales para la fabricación de imanes, para la industria óptica, superconductores y materiales nanoestructurales. Se tratan, también, aspectos teóricos y computacionales. En total 21 ponencias desarrolladas en otros tantos capítulos. De su lectura hemos extraído las siguientes impresiones.

En primer lugar, el alto nivel alcanzado por los investigadores mexicanos en esta rama del conocimiento, lo que resulta más meritorio si se repara en su carácter multidisciplinar. Significaría también que la comunidad científica mexicana no ha renunciado a perder el tren del progreso y, por tanto, a participar en la aventura de la construcción de la nueva era histórica que ahora comienza, lo cual, por otra parte, es digno de la mayor alabanza.

En segundo lugar, la adecuada dosificación de los aspectos científicos y técnicos que se advierte en todos los capítulos, lo que no es siempre fácil de conseguir. Por último, las ponencias que, a mi juicio, poseen suficiente rigor científico; son de una gran claridad expositiva y resultan amenas, características que, en general, se hallan ausentes en este género de trabajos. A ello hay que sumar la agradable presentación del libro, tanto en su impresión como en el abundante material gráfico que contiene.

En resumen, estamos ante un libro que, además de ofrecer un indiscutible interés a los especialistas en estos temas (cuyo número irá creciendo con el tiempo), es también recomendable, por su vocación didáctica, para los estudiosos que deseen estar al tanto de los problemas y logros más importantes de su tiempo. Lástima que se haya demorado tanto su publicación. (L. G.)

Microestructura flexible de un material biocompatible (en este caso, con sustrato de silicio)

Lógica

De Boole a Robinson

STORIA DELLA LOGICA. DA BOOLE AI NOSTRI GIORNI, por Corrado Mangione y Silvio Bozzi. Garzanti; Milán, 1993.

FREGE'S PHILOSOPHY OF MATHEMATICS. Dirigido por William Demopoulos. Harvard University Press; Cambridge, 1995.

WITTGENSTEIN'S METAPHYSICS, por John W. Cook. Cambridge University Press, Cambridge, 1994.

W. V. QUINE: SELECTED LOGIC PAPERS. Harvard University Press; Cambridge, 1995.

ABRAHAM ROBINSON. THE CREATION OF NONSTANDARD ANALYSIS. A PERSONAL AND MATHEMATICAL ODYSSEY, por Joseph Warren Dauben; Princeton University Press; Princeton, 1995.

La revolución más profunda que ha sufrido la lógica se dio a mediados del siglo XIX. Igual que en otras áreas, también aquí la matematización de la disciplina constituyó el elemento determinante. Tal fue, además, el alcance de esa transformación que, durante muchos años, la filosofía quedó restringida, en buena medida, a esa materia propedéutica y a su entorno.

Entre las muchas revisiones generales que han venido apareciendo, la de Corrado Mangione y Silvio Bozzi, *Storia della logica. Da Boole ai nostri giorni,* aporta información suficiente para hacerse una idea bastante sólida de sus figuras y doctrinas principales. Mangione-Bozzi ahondan en el trasfondo matemático —geometría, álgebra y análisis— en que debe entenderse la lógica. Para comprender su origen, en efecto, hemos de conocer la irrupción de las geometrías no euclídeas y el desarrollo del álgebra simbólica.

Desde los *Elementos* de Euclides, la geometría devino el arquetipo del razonamiento riguroso y del análisis lógico. Por su parte, el álgebra se ofrecía como modelo para la ciencia de las *formas* inferenciales. Además de proceder con rigor deductivo, la geometría euclídea se acomodaba a la intuición espacial del mundo exterior. ¿Qué decía a este propósito la filosofía? Para Kant, la geometría euclídea ejemplifica el *conocimiento sintético a priori*; *a priori*, por cuanto no necesita justificarse por la experiencia, y *sintéticos* son los juicios

que formula porque remiten al mundo externo.

La creación del álgebra de la lógica, en la frontera entre la primera y la segunda mitad del siglo XIX, sacó a la luz dos hechos de evidente importancia: la posibilidad de construir una teoría matemática de la lógica y la existencia de un ligamen profundo entre lógica, matemática y filosofía. La algebrización de la lógica la articula, en 1847, George Boole en *El análisis matemático de la lógica: ensayo de un cálculo del razonamiento deductivo*: "Me propongo establecer el cálculo de la lógica, y postular para el mismo un lugar entre las formas reconocidas del análisis matemático." Aunque él apreciaba más *Las leyes del pensamiento*, donde se extiende en cuestiones filosóficas y esboza una teoría de la probabilidad.

La introducción del programa algebraico consiste en dotar a la lógica de los símbolos y leyes del álgebra. Boole desarrolló un álgebra elemental de términos, o clases, en estrecha analogía con el álgebra ordinaria de números. Empleó las notaciones de adición y multiplicación para expresar la unión e intersección de clases, y los números "0" y "1" para la clase vacía y el universo. La unión de dos clases, o suma lógica, requería que las clases fueran mutuamente excluyentes, a la manera de la adición numérica. Esta restricción carente de sentido fue levantada por W. Stanley Jevons, Charles Sanders Peirce, Ernest Schröder y John Venn. Boole numera las condiciones que deben satisfacerse para conducir un razonamiento correcto con la ayuda de los símbolos: que se asigne a los símbolos una interpretación fijada en la expresión de los datos, que los procesos formales de la demostración obedezcan las leyes establecidas y que el resultado final sea interpretable de acuerdo con el sistema empleado en la expresión de los datos.

Boole distingue, pues, dos momentos, semántico y sintáctico, y, aunque no los reputa independientes, privilegia el momento sintáctico en el desarrollo de la argumentación; la interpretación semántica interviene en el momento inicial, donde se fijan los principios formales del cálculo, y en el momento final, cuando se interpreten los resultados. Todas las proposiciones lógicas pueden considerarse, según Boole, como pertenecientes a una de dos clases exhaustivas y disjuntas: la de las proposiciones primarias o concretas y la de las proposiciones secundarias o abstractas. Las fórmulas de álgebra lógica pueden interpretarse como operaciones de silogística aristotélica (*cálculo de clases*) y como operaciones deductivas sobre enunciados complejos (*cálculo de proposiciones*).

Venn considera la lógica simbólica y la matemática como ramas de un lenguaje de símbolos que poseen algunas leyes de combinación en común. Peirce profundiza y sistematiza el sistema booleano; formaliza el cálculo de relaciones. A Schröder se deben los principales resultados en la elaboración del álgebra de la lógica de este período. Boole, Peirce y Schröder atendieron, más que al concepto de estructura abstracta como es hoy de uso común, a las nociones de razonamiento simbólico y de forma. En esta perspectiva, las ideas dominantes serían las de sistema de reglas, de cálculo, de interpretación y de aplicación.

La sustitución del álgebra de la lógica por la lógica del álgebra se debe a Gottlob Frege (1848-1925). Estudió —matemática, física, química y filosofía— en las universidades de Jena y Gottingen. En 1879 publicó *Ideografía. Un lenguaje de fórmulas del pensamiento puro, construido a imagen del aritmético*, donde presenta su sistema de lógica matemática, obra que tardaría décadas en percibirse en su auténtico valor. Sólo Peano y Russell supieron apreciarla. El sistema de la *Ideografía* puede reconstruirse como una presentación axiomática de lógica de segundo orden, susceptible pues de someterse a la prueba de consistencia. En este opúsculo emerge desarrollado el cálculo de predicados. A la *Ideografía* siguieron los *Fundamentos de la aritmética* y las *Leyes básicas de la aritmética*. Los *Fundamentos* no contienen un sistema formal como la *Ideografía* y las *Leyes básicas*.

Frege's Philosophy of Mathematics reúne catorce ensayos publicados en años recientes sobre la obra fregeana: fundamentos de su logicismo, redescubrimiento del teorema de Frege y reevaluación del contenido matemático de sus *Leyes básicas*. La definición del operador de la cardinalidad, sugerida en *Fundamentos* y que se llamaría el principio de Hume, asevera que el número de $F \approx$ el número de G si y sólo si $F \approx G$, donde $F \approx G$ (esto es, hay correspondencia biunívoca entre F y G) tiene su definición explícita. Del principio de Hume se deriva el segundo postulado de Peano ("cada número natural tiene un sucesor") y, para Frege, en el contexto de la lógica de segundo orden, ese principio implica la infinitud de los números naturales; a eso se le llama el *teorema de Frege*: la teoría de segundo orden según la cual el principio de Hume implica la infinitud de los números naturales. El teorema ocupa el corazón matemático de los *Fundamentos*, obra en la que deriva los axiomas de la aritmética a partir del principio de Hume; de manera más precisa Frege da definiciones de cero, es siguiente de y número natural (finito). Muestra que el cero es un número finito, que aquello que siga a un número finito es un número finito, que el cero no es sucesor de nadie y que si m, m', n y n' son números finitos, n sucede a m, y n' sucede a m', entonces $m = m'$ si y sólo si $n = n'$.

El programa fundacional que empezó en la *Ideografía* y se desarrolló en *Fundamentos* representaba el esfuerzo de Frege por establecer la autonomía de la aritmética respecto de la geometría y la cinemática. En la primera, conocida también en castellano por su equivalente *Conceptografía*, distingue entre axiomas y reglas de inferencia, relaciona el cálculo proposicional con el cuantificacional, y formaliza la implicación. Culminaba el proceso de dotar de rigor el cálculo y la teoría de los reales. Frege se propuso, en efecto, realizar para la aritmética lo que Cauchy, Bolzano, Weierstrass, Cantor y Dedekind hicieron para el análisis: darle rigor. Pero, ¿qué rigor? Aquel que consiste en aportar definiciones claras y pruebas matemáticas. La preocupación por el rigor es consecuencia directa de su rechazo de la intuición en el razonamiento aritmético.

Cuando se afirma que Frege es el padre del logicismo se quiere poner énfasis en la reducción de la aritmética a la lógica. Lo que supone admitirla analítica y, por ende, *a priori*. Se aleja así de Kant, para quien las proposiciones de la aritmética eran *sintéticas a priori*. Pero Frege no cae en el empirismo, aunque concede lo que ningún empirista estaría dispuesto a ceder: la geometría euclídea era *sintética a priori*. El logicismo establece que los conceptos de la aritmética pueden definirse en términos de los conceptos de la lógica, y los teoremas de la aritmética pueden demostrarse por medio de leyes puramente lógicas; las verdades de la aritmética son traducibles a verdades de lógica. Además, una proposición es analítica si su prueba hace uso sólo de leyes lógicas generales y definiciones.

El valedor de Frege fue Russell, quien, no obstante, descubrió las contradicciones (paradojas) que entrañaba su sistema. La lógica matemática de comienzos del siglo XX estaba inte-

resada por salvar la matemática de las paradojas lógicas y conjuntistas. Para quienes se ocupaban de los fundamentos de la matemática, la metamatemática ofrecía un medio de usar métodos axiomáticos para investigar la validez de las pruebas o las condiciones bajo las cuales una teoría dada puede considerarse consistente o completa. Los *Principia mathematica* de Russell y Whitehead fue un empeño en esa dirección, como lo fue el desarrollo del programa de Hilbert, tendencia que culminó en los resultados de Kurt Gödel en los treinta.

Discípulo predilecto de Russell, Ludwig Wittgenstein (1889-1951) dominaría buena parte de la filosofía del segundo tercio. Estudió ingeniería mecánica en Berlín y aeronáutica en Manchester. Interesado por los fundamentos de la matemática, acudió a Cambridge con Russell tras abandonar su carrera técnica. Ni siquiera el fragor de la guerra le alejó de los problemas de lógica y filosofía, y fue anotando sus pensamientos en los cuadernos que llevaba en su macuto. Aparecerían con el título de *Tractatus logico-philosophicus*. (Desde los setenta, se han venido multiplicando en España los trabajos sobre Wittgenstein, y sus libros se han traducido, e incluso retraducido cuando la primera versión dejaba que desear.)

En el *Tractatus* se ocupa de la naturaleza del lenguaje; los límites de lo que puede decirse; lógica, ética y filosofía; causalidad e inducción; el yo y la voluntad; la muerte y el misticismo; el bien y el mal. Para Wittgenstein, los límites del lenguaje son los límites del pensamiento. Cuando en el lenguaje común hablamos de mesas y sillas lo que decimos puede analizarse en proposiciones.

De acuerdo con la interpretación común de su obra, Wittgestein rechazó a partir de 1929 las tesis del *Tractatus* para crear una concepción radicalmente nueva de la filosofía, que se epitomiza en las *Investigaciones filosóficas*. No es ésa la opinión de Cook en *Wittgenstein's Metaphysics*, un libro sólido y polémico. Para Cook, Wittgenstein fue empirista, armado con una teoría del significado, a lo largo de toda su vida. Hacia 1916 había abrazado la versión del empirismo que William James llamaba "empirismo radical" y Russell denominó "monismo neutro". Desde esa fecha hasta su muerte su pensamiento fundamental cambió muy poco. El monismo neutro de James, Ernst Mach, Karl Pearson y Wittgenstein niega la dualidad (mente y materia) para aferrarse a la "pura experiencia". El mundo, decía Mach, consta sólo de nuestras sensaciones. No hay nada que sea subjetivo (o privado), ni, por consiguiente, nada que sea incognoscible. El monismo neutro, la ontología de Wittgenstein, es el que le permite resolver los problemas epistemológicos, lo mismo en el *Tractatus* que en las *Investigaciones*.

Cook contrapone su propia tesis frente a siete mitos que han velado la auténtica figura intelectual de Wittgenstein. El mito fundamental, responsable en buena medida de los demás, es que en el *Tractatus* habría mostrado escaso entusiasmo por la epistemología, siendo así que su máxima preocupación era resolver el escepticismo, a cuyo fin se ordenan sus aforismos lingüísticos. Mito de profundo alcance también es el del corte que suponen las *Investigaciones filosóficas* y *Sobre la certeza*, cuyo contenido no puede entenderse bien sin encuadrarlo en el marco de las ideas básicas del *Tractatus* acerca de los objetos materiales, el solipsismo y la causalidad humeana. Cook rechaza también el confinamiento de Wittgenstein a la filosofía del lenguaje ordinario, su supuesto adanismo intelectual y su más que discutible dependencia de Moore.



Karl Weierstrass (1815-1897)

En otra onda, mucho más sistemática, se mueven los *Selected Logic Papers* de Villard van Orman Quine. Abarcan, en esta edición aumentada, ensayos breves escritos por él desde los años treinta hasta nuestros días. Tras estudiar matemática en Harvard, Quine se trasladó a Praga, donde se formó con Rudolf Carnap. Volvió a Harvard para doctorarse en 1932, y allí enseñó desde 1936 hasta 1978. Autor prolífico, Manuel Sacristán, uno de los reintroductores de la lógica simbólica en España, le tradujo al castellano *Palabra y objeto* y *Filosofía de la lógica*.

Quine sobresale entre quienes con mayor claridad y autoridad han divulgado la lógica simbólica. Esas virtudes son, precisamente, las que lucen en *Selected Logic Papers*. Para aproximarnos a ellos, podemos empezar por los ocho últimos y seguir luego con la ordenación que él mismo diseñó para su compilación de 1965. Los ensayos más recientes reinterpretan, por un lado, aportaciones de Boole, Peirce y Peano, y, por otra, abordan aspectos centrales de filosofía de la lógica con una nota apendicular sobre la fundamentación pitagórica del último teorema de Fermat.

De su capacidad de síntesis da fe la entrada "Lógica simbólica", que escribió para la *Encyclopedia americana*. Leamos, por ejemplo, la introducción histórica del mismo: "Notaciones con resabios de álgebra se emplearon de manera esporádica desde Gottfried von Leibniz y, con mayor insistencia, en el siglo XIX (George Boole, William Stanley Jevons, Charles Sanders Peirce). Gottlob Frege en 1879 suplantó la noción algebraica por otra que acentuó mejor los rasgos estructurales más cercanos a la deducción. Floreciendo lo mismo que otras ramas felizmente formuladas de la matemática, la lógica deductiva superó muy pronto su potencia anterior hasta el punto de instar una nueva denominación: lógica 'simbólica' o 'matemática'." En el desarrollo de esta entrada, se ocupa del cálculo proposicional, álgebra de clases (álgebra de predicados monádicos), cuantificación (con su extensión en la lógica de predicados diádicos), identidad, teoría de conjuntos, teoría de la prueba y recursividad. El mismo rigor que evidencia a propósito de visiones generales de este tenor se manifiesta en casos particulares (definición de sustitución o de par ordenado) y reformulación de pruebas (teorema de Church sobre el problema de la decisión).

Otros ensayos responden a una exigencia de ulterior precisión. Así, el dedicado a la completud del cálculo proposicional; o a la concatenación, base de la aritmética, donde explica por qué la aritmética elemental de los números naturales no sólo debe subsumirse en la teoría elemental de la concatenación, sino que debe hacerlo, además, de forma exhaustiva hasta el extremo de que una y otra sean iguales.

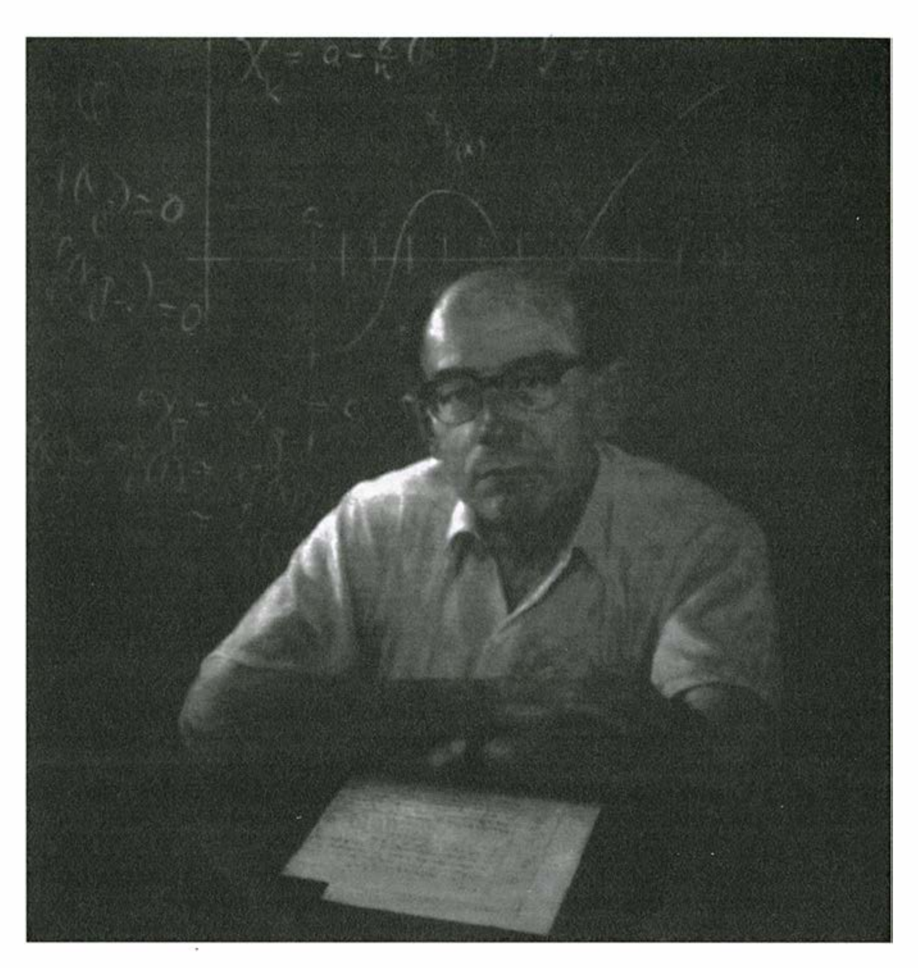
Quine, para quien la lógica es una teoría de primer orden de la cuantificación más identidad, insistió en la distinción entre uso y mención. Siguiendo a Frege, define la verdad analítica como transformación en verdad lógica mediante definiciones

conservadoras del significado. De ello resulta trivial que las leyes de la lógica son analíticas.

"En Estados Unidos", escribía Alonzo Church en 1961 a Angus Taylor, "hay cuatro lógicos a los que yo pondría por delante de Robinson, y tal vez un quinto: Rudolf Carnap, Kurt Gödel, S. C. Kleene, W. V. Quine y Alfred Tarski. Habrá tres o cuatro más que estén a su nivel..." Por esas fechas Abraham Robinson (1918-1974) no había desarrollado aún el análisis no estándar. Pero, ¿quién era este lógico que supo darle aplicación a una disciplina abstracta? De su tiempo, de sus maestros, discípulos, de la evolución de su pensamiento y del desarrollo de la lógica a lo largo de las cuatro décadas centrales del siglo trata Joseph W. Dauben en *Abraham Robinson. The creation of nonstandard analysis. A personal and mathematical odissey.*

Abraham Robinson nació en octubre de 1918 en la ciudad minera de Waldenburg. A los quince años marchó, huyendo de los nazis, a Palestina, donde se enroló en la *haganah* (milicia civil judía clandestina). Estudió matemática con Abraham A. Fraenkel (el de la teoría de conjuntos Zermelo-Fraenkel), quien le hizo partícipe de sus intereses por los fundamentos de la axiomática y de la lógica matemática.

Con veintiún años, publicó su primer artículo en el *Journal of Simbolic Logic* sobre el axioma de extensionalidad (que establece el carácter de igualdad dentro del sistema) y su independencia de otros axiomas de la teoría conjuntista de Zermelo-Fraenkel. En seguida preparó otro sobre álgebra de ideales. Con ese prometedor currículum ganó una beca para trasladarse a la Sorbona con el propósito de "profundizar en metodología matemática". La invasión nazi abortó el curso y huyó a Inglaterra. Las exigencias de la guerra lo convirtieron en experto en aerodinámica (fatiga estructural de los aviones). Como escribiera Hermann Jahn: "Existe una estrecho paralelismo entre Riemann y Robinson. Riemann, famoso en matemática pura, realizó una trabajo excepcional en mecánica de fluidos. También Robinson." Terminada la guerra se trasladó a Canadá. Volvió a Israel y se afincó por fin en Estados Unidos. Murió de cáncer de páncreas a los 55 años; para entonces, el profesor de la Universidad de Yale era un renombrado matemático que había logrado situar la lógica en el umbral de distintas ramas de la matemática. Por ese empeño y por sistematizar el análisis no estándar (teoría que se propone dotar de fundamentos rigurosos al cálculo con los infinitésimos) ocupa un puesto en la historia reciente de la ciencia.



Abraham Robinson (1918-1974)

Le interesó sobre todo la aplicación de la lógica, y en primer lugar al álgebra. En *Sobre la metamatemática del álgebra* precisa que, para proceder a tal aplicación, no estudiará teorema tras teorema, sino que consideraría los teoremas en general. Buscaba dar con el camino para mostrar que un teorema que fuera cierto para un tipo de estructura matemática podía ser válido para otro tipo de estructura. Trató, además, de las propiedades conjuntas de estructuras que satisfacen algunos sistemas específicos de axiomas e introdujo los "conceptos generales" análogos a los del álgebra común, verbigracia, números algebraicos, anillos polinómicos sobre un anillo dado, e ideales.

Vio los sistemas axiomáticos como conjuntos de fórmulas en el seno del cálculo elemental de predicados, tomando las estructuras algebraicas como modelos de sistemas de sentencias. Así, tras describir axiomáticamente los grupos abelianos, mostraba de qué manera los campos, campos conmutativos y campos *p* podían también axiomatizarse.

Desarrolló la teoría de modelos, cuyo objetivo principal consiste en determinar las relaciones entre sistemas de sentencias (frecuentemente del cálculo elemental de predicados) y estructuras matemáticas que satisfacen tales sistemas. Dado un conjunto de sentencias (que pueden ser de número finito o infinito) corresponde a la teoría de modelos hallar la estructura (o estructuras) *M* que satisfacen las sentencias en cuestión.

Más: en sus *Teorías completas*, que giran en torno a la completud de modelos (principio del que demuestra que puede emplearse para establecer la completud de un concepto general) aporta un enfoque ingenioso para determinar las condiciones en que las diversas teorías son completas y decidibles. Introduce el principio de transferencia: "Por principio de transferencia entiendo un teorema metamatemático que asegura que cualquier afirmación de un tipo especificado que sea cierta para una estructura o clase particular, lo es también para cualquier otra estructura o clase de estructuras." Da la primera demostración genuinamente semántica del teorema de Beth ligándola con un teorema de coherencia (el teorema de coherencia de Robinson). (L. A.)



Ralph E. Gomory

Lo conocido, lo desconocido y lo incognoscible

En la enseñanza se nos instruye sobre lo conocido, pero raras veces sobre lo desconocido y casi nunca sobre lo incognoscible. Tal orientación puede originar erróneas concepciones acerca de nuestro mundo.

Desde el comienzo de nuestra vida se nos obliga a aprender lo conocido. En la escuela primaria empezamos cada curso con un grueso libro lleno de cosas que ya son conocidas pero *nosotros* aún las ignoramos. Y, por supuesto, tras este libro vendrán otros y tras el primer curso otros más. La última frontera del saber, allí donde éste confina con lo desconocido, parece muy lejana e irrelevante, como si la separara de nosotros una expansión ilimitada de lo conocido. No caemos en la cuenta de que, al aprender, quizás estemos bajando por una estrecha senda y, si miramos un poco a un lado o al otro, se nos perderá la vista en el abismo de lo desconocido.

Aun cuando estemos precisamente al borde de ese abismo, puede que no nos percatemos de ello. Los que aprendíamos en la escuela la historia de las guerras médicas no advertíamos que la vívida descripción de aquellos acontecimientos se basa en Herodoto, única fuente de información conservada. Casi todo lo que sucediera en la Grecia de aquel entonces y no haya sido relatado por Herodoto es desconocido y probabilísimamente no se podrá saber nunca. Sin embargo, no creíamos que las noticias que da el "padre de la Historia" fuesen fragmentos de conocimiento que estuvieran al borde de lo desconocido; no eran sino un material más del enorme montón de "hechos" de la historia de Grecia que teníamos que aprender.

A causa de tales enseñanzas, crecimos pensando que lo conocido es más de lo que realmente es. Si contáramos con una mejor descripción de los límites del saber actual, esa descripción podría formar parte de nuestra enseñanza. Instruidos así, dispondríamos de mejores perspectivas acerca de lo que actualmente se sabe o se ignora.

Con el tiempo llegarán a saberse muchas cosas que ahora se ignoran, aprenderemos más acerca de lo que hay bajo la piel de la Tierra y acaso logremos enterarnos de cómo interactúan nuestras neuronas para permitirnos percibir y pensar. Pero el ir acumulando datos puede ser engañoso, porque más allá de lo que actualmente se desconoce hay cosas que son intrínsecamente incognoscibles.

Pocas cosas incognoscibles son conscientemente reconocidas como tales. A esta reducida clase pertenece la relación que pueda haber entre el girar de una ruedecilla y el tiempo que hará en determinado sitio dentro de tres meses. Sin embargo, cada día nos encontramos con fenómenos que, por muy incognoscibles que acaso sean, nunca los reconocemos como tales. Algunos de esos incognoscibles constituyen la base de respetadas profesiones. Los agentes de bolsa se ganan la vida previendo las fluctuaciones de los precios del mercado; los presidentes de banco acuden presurosos a consultarles cómo hacer prosperar una vasta y mal comprendida economía compuesta de muchos sectores que se influyen recíprocamente de un modo impredecible. La verdad es que aquí ni siquiera sabemos si se trata de lo conocido sólo en parte, de lo mayormente desconocido o de lo incognoscible.

Con todo, inconscientemente reconocemos que nos rodea lo incognoscible. Nadie tiene la menor idea de quién se presentará como candidato a Presidente dentro de 20 años, ni pretende saberlo. Tampoco intenta nadie predecir en qué accidentes automovilísticos se verá envuelto. Para saber que el año que viene chocará el coche de otro contra el nuestro tendríamos que conocer, con una exactitud imposible, todos los particulares de la vida de ese conductor, sus costumbres, su horario, su modo de pisar el acelerador y así sucesivamente todas las acciones que serían necesarias para llevarle con perfecta precisión al desgraciado choque. Es evidente que la totalidad de esos detalles nos es desconocida, y si no nos empeñamos en averiguarlos es porque instintivamente caemos en la cuenta de que son también incognoscibles.

En el distinguir entre lo conocido o lo desconocido y lo incognoscible puede ser decisivo el nivel del detalle. Este es lo que separa la ilusión del jugador en busca de fortuna del dueño del casino: el jugador intenta predecir las distintas e impredecibles revoluciones de la ruleta, mientras que el dueño del casino se interesa por el muy predecible promedio de los resultados.

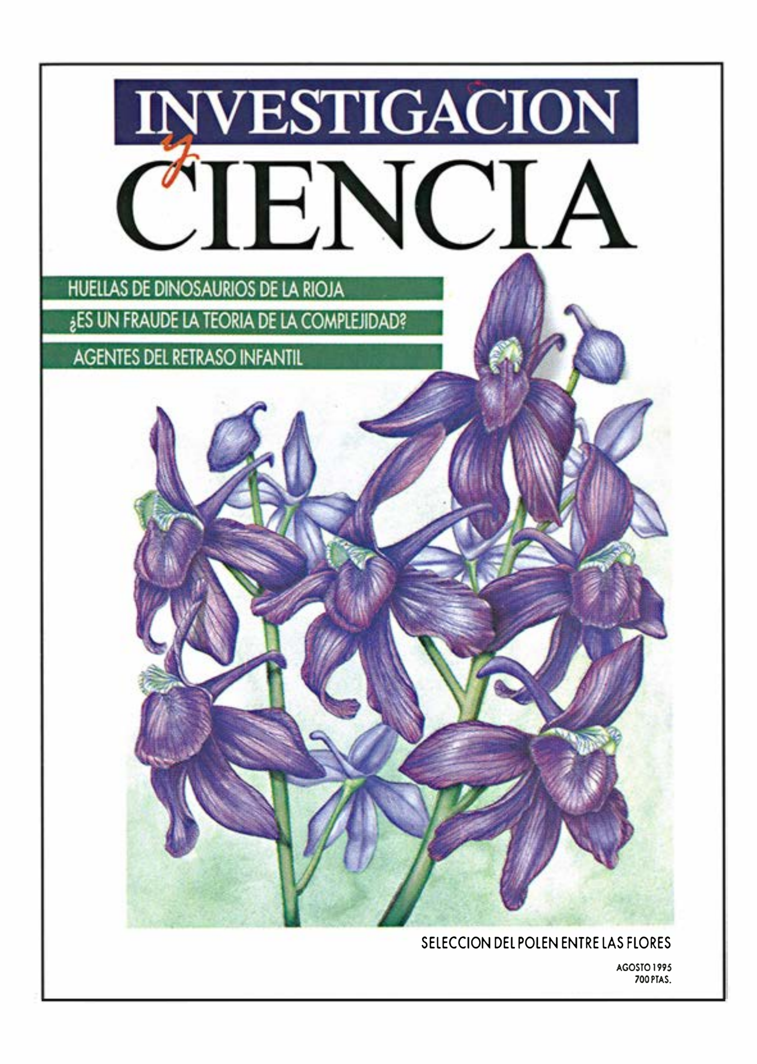
Al proceso predictivo le favorece el hecho de que lo artificial es, por lo común, más simple que lo natural. Por ejemplo, el trayecto que seguirá una bola rodando por el canal de la bolera es más fácil de predecir que el de un pedrusco que caiga dando tumbos por la superficie irregular de una ladera. Es probable que lo artificial nos vaya librando cada vez más de lo imprevisible. Tal vez sea más fácil avanzar gradualmente hacia una Tierra completamente cercada cuyo clima pueda ser controlado artificialmente que aprender a predecir el tiempo natural.

En el crear lo artificial y lo controlable es eminente la ciencia. Ella y la ingeniería han posibilitado la construcción del ambiente en gran parte artificial en que hoy vivimos, repleto de enormes puentes, camiones, aeroplanos, antibióticos y especies genéticamente alteradas. Estamos en vías de construir un mundo cada vez más artificial y, por ende, cada vez más cognoscible.

Dos limitaciones pueden frenar la marcha de la previsibilidad. La primera es que, como los artefactos de la ciencia y de la ingeniería se van haciendo cada día mayores y más complicados, quizá lleguen a ser ellos mismos imprevisibles. Las grandes piezas de programación, según se las va generalizando y refinando, tal vez alcancen un grado de complejidad afín al de los objetos naturales y puedan comportarse y se comporten de manera inquietante e imprevisible. Y la segunda limitación, que en este nuestro mundo cada vez más artificial habrá gran cantidad de seres humanos de una complejidad enteramente idiosincrásica.

RALPH E. GOMORY es el presidente de la Fundación Alfred P. Sloan

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



ICNITAS DE LA RIOJA, por José-Vicente Santafé y M. Lourdes Casanovas

Las huellas de dinosaurios de esta región vienen estudiándose desde 1969. Las inmejorables condiciones de conservación de la mayoría de las icnitas y su variedad han proporcionado interesantes datos paleontológicos.

LOS MAYORES IMANES DEL MUNDO, por Greg Boebinger, Al Passner y Joze Bevk

Potentísimos imanes que acumulan energías comparables a cartuchos de dinamita, compiten a lo ancho del mundo por hacer progresar nuestros conocimientos de los materiales y de la física.

INFECCION POR ANQUILOSTOMA, Peter J. Hotez y David I. Pritchard

Abandonada hasta hace poco por la investigación científica, esa infección produce retraso intelectual y de desarrollo en millones de niños. Los últimos hallazgos, sin embargo, hablan de las posibilidades reales de hallar una vacuna.

LA ARITMETICA DE LA MUTUA AYUDA, Martin A. Nowak, Robert M. May y Karl Sigmund

¿En qué casos debe cooperar un individuo con otros? ¿Cuándo tiene sentido traicionarlos para obtener egoistamente una ventaja? Los ecos de la respuesta resuenan a lo ancho y largo de la biología evolutiva y de la sociología.

LA INTERPRETACION DE UN PROYECTO ROMANO, por Lothar Haselberger

Sin saberlo, los visitantes al Mausoleo de Augusto en Roma han estado, durante siglos, caminando sobre un gigantesco plano. En el pavimento del exterior de la entrada están cincelados los planos arquitectónicos de la fachada de uno de los monumentos más emblemáticos de Roma.

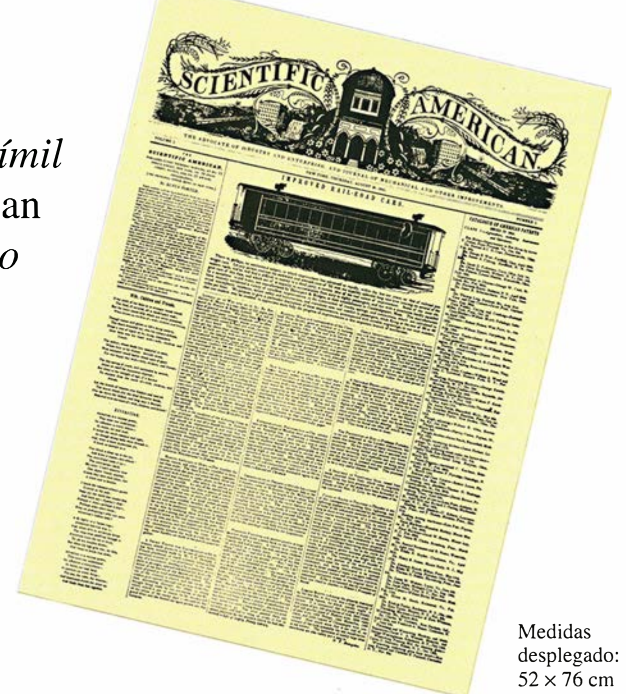
NUCLEOS CON HALO, por Sam M. Austin y George F. Bertsch

Los núcleos que tienen un exceso de neutrones o de protones vacilan en las llamadas "líneas de las gotas", los bordes de la estabilidad nuclear. Sometidos a esa tensión, algunos desarrollan un halo.

DE LA COMPLEJIDAD A LA PERPLEJIDAD, por John Horgan

¿Puede lograr la ciencia una teoría unificada de los sistemas complejos? Incluso en el Instituto Santa Fe, consagrado al progreso en ese tipo de cuestiones, ciertos investigadores tienen sus dudas.

... Además se incluirá el facsímil del número 1 de Scientific American *en conmemoración del 150 aniversario de su publicación*



Medidas desplegado: 52 × 76 cm

Adquiéralo en su quiosco a partir del 28 de julio

